INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL ENIGMA DEL MUON | LAS MATEMÁTICAS DE LA CONECTIVIDAD | VIDA BAJO EL SUBSUELO MARINO

N.º 537 JUNIO 2021

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2021 • N.º 537 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

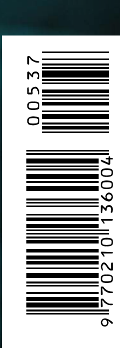
EL ENIGMA DEL MUON

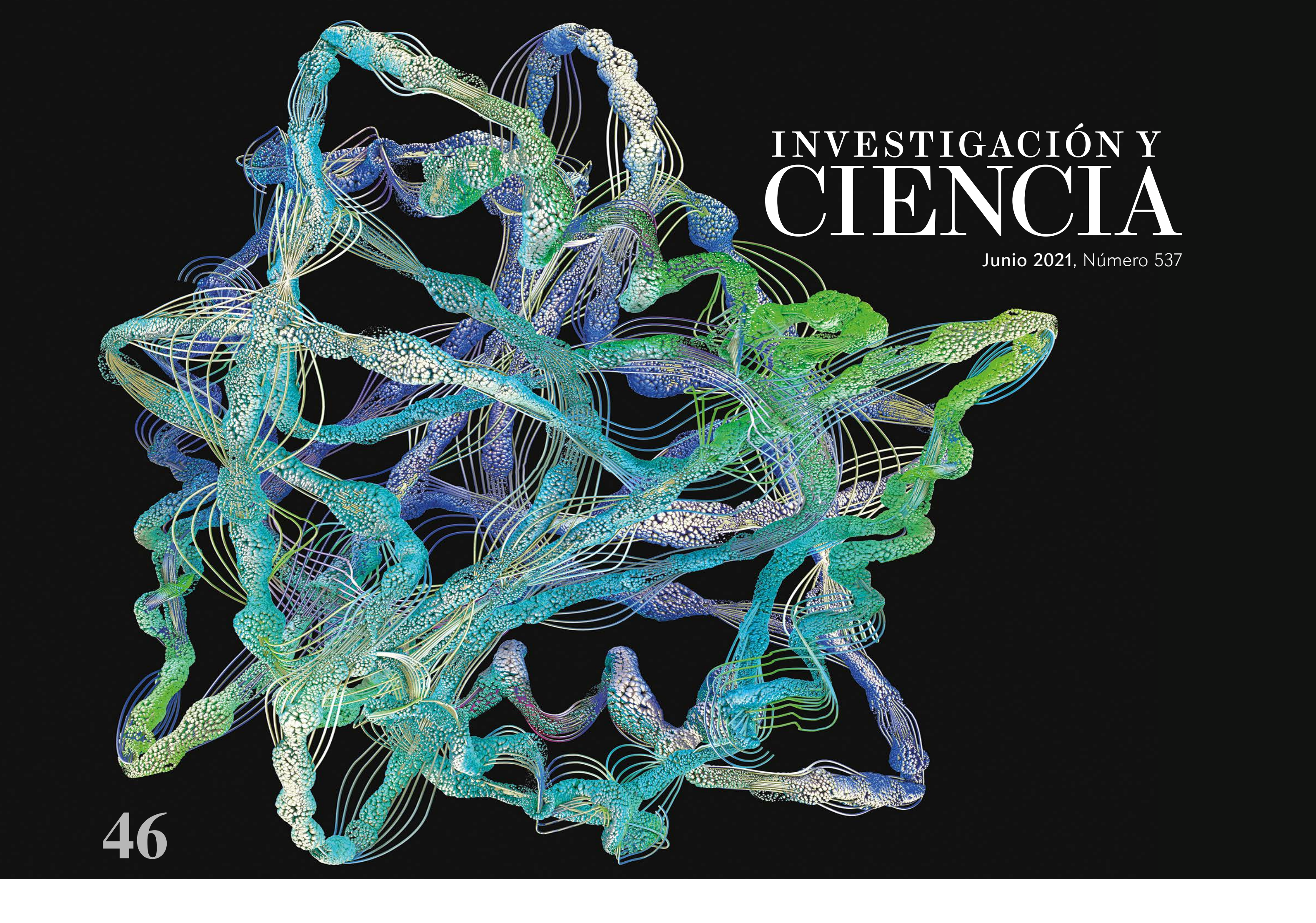
¿Esconde esta partícula elemental nueva física?

COVID-19
Claves para comprender las redes de contagio

MICROBIOLOGÍA
La vida bajo el inhóspito subsuelo marino

TECNOLOGÍA
Nuevas aplicaciones de la óptica adaptativa

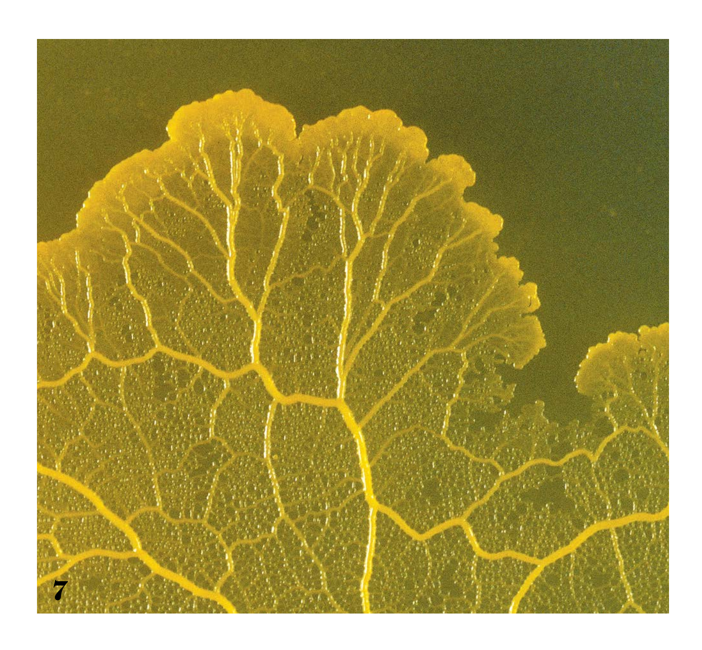


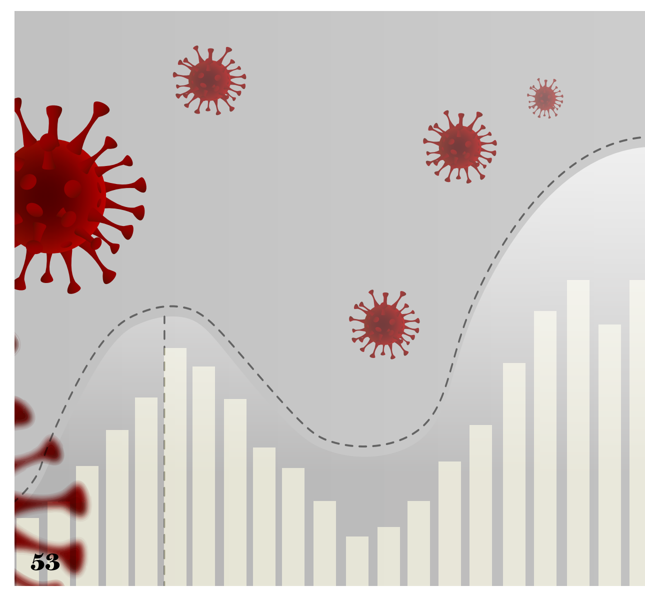


INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Junio 2021, Número 537

ARTÍCULOS

GETTY IMAGES/CHRISTOPH BURGSTEDT/ISTOCK


7


53


88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Hace décadas que el estudio de las propiedades magnéticas del muon, una partícula elemental casi idéntica al electrón, viene ofreciendo una de las vías más prometedoras para investigar la naturaleza del vacío cuántico. Tras veinte años de espera, un nuevo experimento ha sacado a la luz una intrigante discrepancia entre los datos empíricos y las predicciones teóricas relativas a esta partícula. ¿Hay nueva física fundamental detrás? Getty Images/dem10/iStock



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2021

EXPLOSIONES CÓSMICAS

En «Supernovas extremas» [Investigación y Ciencia, febrero de 2021], Anna Y. Q. Ho explica que la envoltura observada en torno a la explosión estelar SN2018gep tuvo que haberse desprendido de la estrella en los últimos momentos de su vida, ya que se encontraba muy cerca de ella cuando estalló y, por tanto, no habría tenido tiempo de alejarse mucho. Sin embargo, ¿no es posible que la envoltura de material hubiera sido expulsada mucho antes, que después se frenara debido a la gravedad de la estrella, y que en el momento de la explosión se encontrara cerca porque estaba cayendo hacia ella?

En otro momento del artículo, al mencionar otra explosión estelar, la autora explica que «la estrella estalló cuando el universo tenía tan solo 2300 millones de años, y los fotones de la explosión tardaron 11.400 millones de años en llegar a la Tierra. Hoy, el cataclismo se encuentra a una distancia de 21.000 millones de años luz, puesto que el universo se ha expandido mucho desde que se produjo». Pero ¿no se corresponde esa expansión con los 11.400 millones de años que tardó en llegar la luz? ¿Cómo compatibilizar esos 21.000 millones de años luz de distancia con un universo que debería medir unos 13.800 millones de años luz?

Pere Palou
Mallorca

Responde Ho: *Para ser expulsada de la estrella, la envoltura tuvo que haber abandonado el astro a la velocidad de escape, la cual asciende a unos 1000 kilómetros por segundo. Eso significa que viajaba lo suficientemente rápido para superar la gravedad de la estrella. Con el tiempo perderá energía y se ralentizará, pero no a causa de la propia estrella.*

Definir «distancia» en un universo en expansión es complicado. El número que daba en el artículo (21.000 millones de años luz) es lo que los astrónomos llamamos «distancia comóvil», y es probablemente lo más parecido a tomar una regla y medir la distancia entre dos objetos tal y como están situados hoy en día. Es cierto que el universo solo se ha estado expandiendo durante 13.800 millones de años, y que eso significa que cualquier luz que nos llegue tuvo que haber sido emitida hace menos de ese tiempo. Sin embargo, la distancia física entre dos objetos puede ser mucho mayor de 13.800 millones de años luz. Supongamos que un fotón que recibimos hoy ha tardado 13.800 millones de años en llegar. Mientras viajaba, el universo se ha estado expandiendo enormemente. Eso significa que, hoy, el punto de partida del fotón se encontrará a más de 13.800 millones de años luz de nosotros.

MEJORAR LA DIVULGACIÓN

El artículo «Errores y sensacionalismo en la divulgación científica» [Tomás Ortín y Ángel Uranga; Investigación y Ciencia, abril de 2021] proporciona ejemplos de cómo el abuso de la analogía, la simplificación excesiva, la precipitación en la información y la tendencia periodística a la mitomanía desvirtúan la divulgación de la ciencia. En realidad, muchos conceptos científicos son tan complejos que ni siquiera la comunidad de expertos tiene una explicación consensuada (como ocurre, por ejemplo, con la interpretación última de la mecánica cuántica). Por ello, es muy importante definir a quién va dirigida la información: no precisa el mismo grado de exactitud terminológica o conceptual la divulgación científica dirigida a motivar a adolescentes que aquella enfocada a un público más especializado.

Estoy muy de acuerdo con el decálogo de buenas prácticas propuesto en el artículo. Sin embargo, añadiría un elemento extra: la implicación de las diversas sociedades científicas para garantizar una buena comunicación de la ciencia. A mi juicio, las sociedades científicas no se involucran lo suficiente a la hora de contextualizar y explicar la verdadera relevancia de los hallazgos. Muchos periodistas pueden tener dificultades para identificar la fiabilidad de las informaciones científicas y para contrastarlas (en mi caso, recientemente he colaborado con Newtral sobre el problema de las «revistas depredadoras», o *predatory journals*). Las sociedades deberían seleccionar a algunos de sus integrantes con especial habilidad para la comunicación —y siempre que puedan demostrar ausencia de conflictos de interés— a fin de que sirvan de enlace con los periodistas y puedan trabajar juntos a la hora de comunicar la ciencia a la sociedad. Quizás así evitemos la ya habitual noticia descontextualizada en la que, por ejemplo, el descubrimiento de un gen relacionado con la metástasis poco menos que significa la cura definitiva del cáncer.

Pedro David Delgado López
Hospital Universitario de Burgos
Presidente de la Sociedad Castellanoleonesa de Neurocirugía



Abril 2021

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



En aquellos yacimientos donde los restos óseos abundan y se encuentran muy desordenados (en la fotografía, un yacimiento en la frontera entre Utah y Colorado), reconstruir el esqueleto de un dinosaurio individual puede suponer todo un reto para los paleontólogos.

DEA, C. DANI, I. JESKE, GETTY IMAGES

PALEONTOLOGÍA

Rompecabezas prehistórico

Un nuevo método ayuda a reconstruir esqueletos de dinosaurios

El Oeste Intermontano de Estados Unidos está sembrado de huesos de dinosaurios. En estratos rocosos del Jurásico superior que se extienden desde Nuevo México hasta Montana, los paleontólogos han descubierto yacimientos muy ricos en osamentas fosilizadas. Ya sea conectados anatómicamente o apilados, es posible encontrar abundantes huesos de reptiles prehistóricos tan emblemáticos como *Allosaurus*, *Stegosaurus* o *Diplodocus*. Las inundaciones monzónicas de aquel período arrastraron manadas enteras cuyos restos quedaron amontonados y cubiertos por los sedimentos. Sin embargo, y aunque a primera vista un yacimiento así podría parecer un paraíso, se trata más bien de un gigantesco quebradero de cabeza para todo aquel que quiera desentrañar su historia.

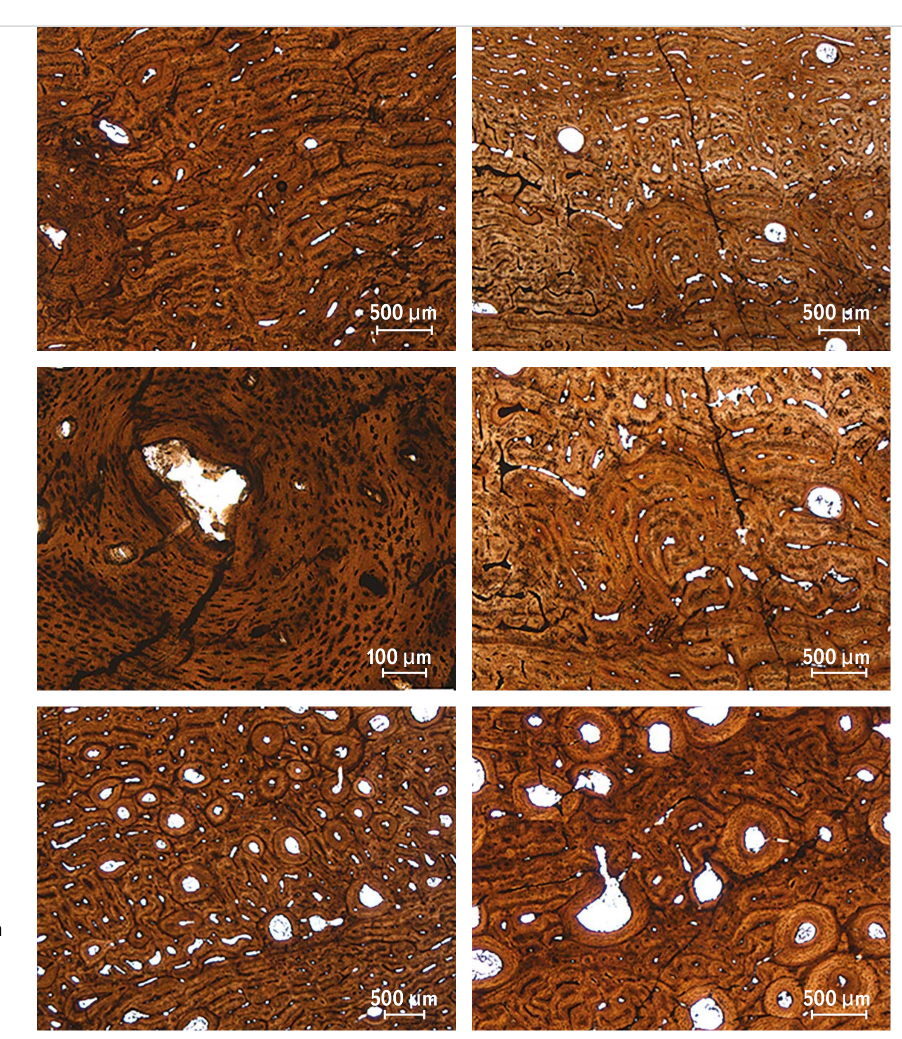
«¿Cuántos dinosaurios tenemos aquí?» puede parecer una pregunta sencilla, pero no lo es para los paleontólogos. Cada esqueleto de dinosaurio, grande o pequeño, contiene doscientos huesos o más. Y cuando esos lechos óseos se formaron en el Jurásico superior, los esqueletos no siempre permanecieron conectados (articulados) ni juntos (asociados): la descomposición, los carroñeros y las riadas los separaron y los dispersaron. En lugares como el yacimiento Cleveland-Lloyd Dinosaur Quarry, en el centro de Utah, no se encuentra ningún esqueleto entero y articulado. Se calcula que allí se ubican los restos de, al menos, 46 *Allosaurus*, pero solo porque se han reconocido 46 fémures izquierdos de esta especie. Y tal cifra no es más que un cálculo de mínimos, ya que es probable que el fémur izquierdo de algunos individuos se haya perdido para siempre.

En otros yacimientos ocurre algo parecido. «Hasta ahora, el criterio principal para asignar huesos a un individuo era que los restos estuviesen articulados o asociados», explica Kayleigh Wiersma-Weyand, estudiante de posgrado de la Universidad de Bonn. Por regla general, los paleontólogos suponen que los huesos de la misma especie, cercanos entre sí y con un tamaño similar pertenecen a un mismo individuo, pero no hay modo de saberlo con certeza. Ahora, en un trabajo publicado en *Palaeontologia Electronica*, Wiersma-Weyand y sus colaboradores ofrecen una solución: analizar el interior de los huesos.

Los yacimientos de Howe-Stephens y Howe Scott, en Wyoming, son desde hace tiempo un tesoro para los paleontólogos. Pero, al igual que ocurre en otros ricos yacimientos del Jurásico dispersos por el oeste de Estados Unidos, los restos se esparcieron antes de quedar enterrados. Sin embargo, gracias el examen de la microestructura celular ósea, los autores lograron asociar huesos aislados a individuos concretos.

Para ello, los investigadores cortaron finas láminas de huesos de las extremidades de saurópodos de cuello largo (un procedimiento que, si se realiza con cuidado, no daña la estructura general del hueso) y las examinaron al microscopio. Su trabajo es el primero que combina varios tipos de análisis microestructural a fin de emparejar cada hueso con su esqueleto. La técnica requiere examinar características como las líneas de crecimiento, el número de orificios abiertos en el tejido óseo para dar paso a vasos sanguíneos, o las estructuras circulares donde el tejido nuevo ha reemplazado al viejo.

«Creo que se trata de una estrategia inteligente para un problema habitual», opina Michael D'Emic, paleontólogo de la Universidad de Adelphi que no participó en el trabajo. Afirmar si un hueso está emparejado o no con otros hallados en el mismo yacimiento puede ser difícil, sobre todo en colecciones históricas con décadas de antigüedad. Algunos esqueletos exhibidos en los museos son reconstrucciones hechas con huesos descubiertos en un mismo lugar pero dispersos, sin que haya modo de saber si todos ellos pertenecieron o no al mismo animal. «Este artículo proporciona un sistema novedoso para saber quién es quién», añade D'Emic. Al menos, siempre que los museos faciliten las muestras necesarias.



Imágenes microscópicas del fémur de un *Apatosaurus* apodado Jacques. Los detalles revelan canales vasculares y signos de crecimiento óseo.

El nuevo estudio se basa en décadas de investigación sobre el modo en que el crecimiento y la vida del animal quedan grabados en el hueso. Dicha investigación se había centrado en distintos huesos de varios lugares, explica Wiersma-Weyand, «pero ahora podemos aplicar nuestros conocimientos generales a depósitos concretos», añade la experta.

En el caso de un saurópodo apodado Max, por ejemplo, casi todos los huesos se encontraron en una pila de restos desarticulados. Dos de la extremidad inferior siguen unidos, pero ¿pertenecieron los demás a este *Galeamopus*? Los investigadores comprobaron que los detalles estructurales de los huesos articulados coincidían con los de muchos de los desarticulados, lo que indicaba que pertenecieron a un mismo individuo. Sin embargo, también descubrieron que algunos huesos que hasta entonces se habían asignado a Max en virtud de su aspecto pertenecieron realmente a otros ejemplares. Gracias a ello, los autores pudieron recomponer parcialmente el verdadero esqueleto de Max 148 millones de años después de su muerte.

El nuevo estudio adolece de ciertas limitaciones. «Los distintos elementos de un [mismo] esqueleto soportan fuerzas biomecánicas diferentes y presentan perfiles biomecánicos ligeramente dispares», afirma Julia McHugh, paleontóloga de los Museos del Oeste de Colorado que no participó en la investigación. Wiersma-Weyand admite esta dificultad, pero matiza que el método ideado por su grupo puede ser mucho mejor a la hora de determinar qué huesos no van juntos. Comenzar por aquellos que aún estaban articulados o asociados ayuda a fijar un punto de partida para asignarles más huesos. Y las múltiples líneas del análisis microscópico funcionan mejor para contrastar la hipótesis de que los huesos pertenecieron a un mismo animal.

Aparte de estimar mejor la cantidad de individuos presentes en un yacimiento, McHugh señala que este análisis de la microestructura ósea podría tener más aplicaciones, y no solo en el estudio de los dinosaurios. «Podría ser de gran utilidad para determinar el perfil de edad de la población de un lecho óseo», ya se trate de dinosaurios del Jurásico o de mamíferos fósiles, explica la experta.

Esta estrategia también ayudará a saber cómo acabaron los restos en el lugar, aclara Wiersma-Weyand. Por ejemplo, en un canal fluvial petrificado, asignar los huesos a individuos concretos ayudaría a determinar la dirección de la corriente cuando quedaron enterrados. Eso resultaría esencial para reconstruir cómo se formaron los yacimientos y determinar si fue en un único episodio de enterramiento o en varios.

«Es fascinante», valora Joseph Peterson, paleontólogo de la Universidad de Wisconsin en Oshkosh que no intervino en el estudio. «Saber cuántos esqueletos desarticulados yacen en un mismo entorno supondría aplicar a la paleontología las técnicas forenses y criminalísticas modernas.»

—*Riley Black*

BIOLOGÍA

Memoria de moho

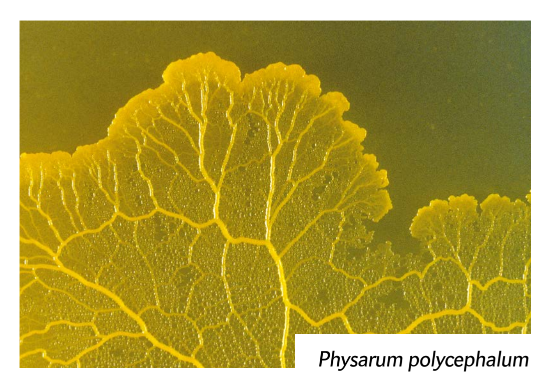
Los hongos mucilaginosos «recuerdan» dónde hay alimento

Como todos los mohos mucilaginosos, Physarum polycephalum no posee cerebro ni sistema nervioso, pero aun así «recuerda» de algún modo los lugares donde ha encontrado alimento. En un artículo novedoso, las biofísicas Mirna Kramar y Karen Alim, del Instituto Max Planck de Dinámica y Autoorganización de Gotinga, describen los cambios en la estructura interna del organismo con los que este codifica la localización de las fuentes de alimento.

Pese a su extrema simplicidad, meras redes de túbulos entrelazados, los hongos mucilaginosos son capaces de resolver problemas de optimización complejos, como hallar el trayecto más corto a través de un laberinto. Los patrones de actividad estímulo-respuesta puros, como la migración hacia lugares con concentraciones crecientes de ciertas moléculas o la elusión de los estímulos mecánicos nocivos, no bastan para explicar esa habilidad. Hace tiempo que se intenta averiguar de qué forma perciben y retienen esa información.

Publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, el estudio revela que cuando un seudópodo de *P. polycephalum* entra en contacto con una fuente de nutrientes, libera una sustancia que ablanda las paredes gelatinosas de la red de túbulos, haciendo que estos se dilaten por la presión interna. El hongo se desplaza mediante la extensión de los túbulos más gruesos y la retracción de los más estrechos. De este modo, en los túbulos dilatados quedan guardados los lugares donde había alimento, puesto que influyen en la dirección general de crecimiento del organismo, incluso una vez que los nutrientes han desaparecido.

No se sabe todavía qué es la sustancia reblandecedora, pero a partir de la modelización de las variaciones en el diámetro de los túbulos se ha deducido que probablemente se trate de una sustancia soluble, propagada por el flujo de líquido o por difusión. El equipo plantea que el mecanismo podría ser común en otras «redes fluidas vivientes», como el sistema vascular de los vertebrados.



Physarum polycephalum

Kramar y Alim «han sabido precisar muy bien un proceso mecanobiológico del comportamiento del hongo mucilaginoso que le dota de una suerte de memoria», afirma a título de observador Hans-Günther Döbereiner, físico de la Universidad de Bremen. Cree también que las investigaciones futuras sobre la capacidad del hongo para llevar a cabo tareas complejas exigirán un examen de los «mensajeros moleculares, las propiedades de los materiales y los movimientos del líquido celular que regulan su comportamiento».

El biólogo Simon Garnier, del Instituto de Tecnología de Nueva Jersey, ajeno también al estudio, añade que el trabajo descansa en estudios precedentes sobre el modo en que este organismo codifica las experiencias pasadas. El modelo de las autoras «ofrece una elegante explicación mecanicista del modo en que el moho mucilaginoso logra esta hazaña», afirma. Podría conducir a la mejora de los algoritmos de optimización de redes y de planificación de rutas, de forma similar a los inspirados por los hormigueros, concluye Garnier.

—Lars Fischer

ENERGÍA

Potencia lacustre

El metano presente en el agua dulce podría proporcionar energía renovable

En 1776, el físico italiano Alessandro Volta descubrió que en el extremo cenagoso de un lago de montaña había algo que burbujeaba entre los juncos. Aquello resultó ser metano, un potente gas de efecto invernadero producido por los microorganismos que viven en los sedimentos de los lagos. Según los últimos cálculos, los lagos y los embalses representan entre el 10 y el 20 por ciento de las emisiones globales de metano, y los científicos esperan que su contribución aumente debido al cambio climático y a la escorrentía de nutrientes.

Sin embargo, el metano es también un combustible, como descubrió Volta al prenderle fuego. De hecho, es el principal componente del gas natural. Ahora, un estudio publicado en *Environmental Science & Technology* sugiere que el metano presente en el agua dulce podría constituir una fuente de energía que habríamos pasado por alto.

Los autores proponen extraer metano del lecho de los lagos usando una membrana especializada para separarlo del agua, y zeolitas (un mineral) para atrapar las moléculas del gas, las cuales se bombearían luego a la superficie. Hoy en día esas membranas son capaces de aislar el metano de las aguas residuales, y también se están desarrollando zeolitas sintéticas prometedoras, afirma Maciej Bartosiewicz, biogeoquímico de la Academia Polaca de Ciencias y autor principal del estudio. Bartosiewicz prevé comenzar a pequeña escala, quizá con dispositivos móviles instalados en los embalses de las centrales hidroeléctricas —que a menudo emiten metano— como complemento a otras opciones de energía sostenible.

Desde 2015 se bombea el agua rica en metano de las profundidades del lago Kivu, en Ruanda, para suministrar electricidad a nivel local. Pero ese lago posee una cantidad excepcionalmente alta del gas, y algunos científicos dudan que se pueda (o de deba) extraer en otros entornos. A concentraciones más bajas, la extracción de metano aún no es rentable, y «es probable que requiera una enorme cantidad de material y energía», opina David Bastviken, científico ambiental de la Universidad de Linköping que no participó en la investigación. A Bastviken también le preocupan las posibles consecuencias ecológicas.

Bartosiewicz admite estas dificultades, incluidos los posibles efectos sobre los microorganismos que consumen metano y sobre el resto de la cadena trófica. Pero señala que las actividades humanas han incrementado la producción de este gas en muchos ecosistemas, por lo que extraer algo de gas podría ser aceptable en ciertos lugares, al tiempo que añade que está deseando buscar soluciones: «Es necesario dar un paso adelante».

—Julia Rosen

SCOTT CAMAZINE, SCIENCE SOURCE

SOSTENIBILIDAD

Raticida para restaurar las costas

Deshacerse de los invasores terrestres también beneficia a los organismos marinos



Cuando Carolyn Kurle pisó por primera vez la isla de Hawadax, en Alaska (entonces conocida como isla Rata), se percató del silencio de inmediato. «Cuando visitas una isla a la que no han llegado las ratas, se ven aves por todos lados, el ambiente es muy ruidoso. Así que cuando pisas otra poblada por ellas, realmente notas la diferencia», explica.

Hawadax vuelve a ser ahora un lugar bullicioso. Hace casi una década se emprendió una campaña de desratización y las aves marinas han regresado en abundancia. No solo eso: los beneficios se han extendido a todo el ecosistema costero, que vuelve a bullir de vida marina. Publicados en *Scientific Reports*, estos resultados muestran que algunos ecosistemas se recuperan con una rapidez sorprendente si se les da la oportunidad.

«El estudio ofrece un ejemplo de lo positivas que llegan a ser las medidas de limpieza de lo que los humanos dejamos atrás», afirma Kurle, autora principal del trabajo y ecóloga de la conservación en la Universidad de California en San Diego. «También pone de manifiesto que todo está interconectado, especialmente en los sistemas costeros.»

Kurle comenzó a estudiar los efectos ecológicos de la rata parda (*Rattus norvegicus*) en el remoto archipiélago de las Aleutianas, como parte de su tesis doctoral. Este voraz roedor colonizó Hawadax tras el naufragio de un navío japonés en la década de 1780 y no tardó en aniquilar las colonias de aves marinas. Sus primeros resultados, publicados en 2008, demostraron que la depredación no solo afectó a las aves, sino a toda la cadena alimentaria, hasta las propias algas. Sin aves que devorasen los invertebrados de la costa, las caracolas, las lapas y otros herbívoros marinos se multiplicaron sin control y acabaron devorando gran parte de las laminarias gigantes (kelp), que constituyen un hábitat esencial para otros seres vivos. «El impacto de

ANTROPOLOGÍA

Tela de hongo

Hallan un tejido de origen fúngico en una pieza de museo

Los fabricantes de biomateriales cada vez están más expectantes con la posibilidad de que los hongos se conviertan en una fuente de alternativas sostenibles y resistentes al plástico y al cuero. Pero un nuevo descubrimiento desvela que los amerindios ya fabricaban «micotejidos» hace un siglo al menos. En el estudio, publicado en *Mycologia*, se confirma el origen fúngico de dos alforjas de pared tejidas por una nativa tlingit de Alaska en 1903. En Europa se tiene constancia del uso de tejidos derivados de hongos en tiempos históricos, pero «por lo que sé, esta es la primera vez que se confirma un material así en América del Norte», afirma Nancy Turner, etnobotánica en la Universidad de Victoria, que no ha participado en el estudio.



Agárico blanco

Deborah Haynes, una de las autoras, se topó con los objetos en los almacenes del Museo Hood de la Universidad de Dartmouth, donde trabajaba como documentalista de colecciones. El propietario original había etiquetado una de las alforjas como: «Par de bolsas de hongo. Regalo de bodas de los vecinos indios». Intrigada, Haynes pasó años llamando a expertos para que comprobasen la veracidad de la nota, pero nadie había oído hablar de telas confeccionadas con hongos y sus pesquisas no despertaron gran interés. «Me obsesioné con ellas y no paré hasta averiguar de qué estaban hechas», confiesa.

Por fin obtuvo una pista cuando pudo examinarlas atentamente con el microscopio electrónico de barrido de la universidad. Las imágenes revelaron micelios, masas de filamentos (hifas) entrelazados que penetran en el suelo o en la madera y llegan a formar tapetes gruesos que son tenaces, flexibles y duraderos. «No se pueden rasgar con las manos, como el cuero», afirma otro autor del estudio, Robert Blanchette, fitopatólogo forestal de la Universidad de Minnesota.

Comparando las características microscópicas de los micelios con descripciones modernas de especies, Blanchette determi-

THOMAS FUCHS (*ilustración*); UNIVERSAL IMAGES GROUP NORTH AMERICA LLC, DEAGOSTINI Y ALAMY STOCK PHOTO (*hongo*)

ciertas especies invasoras puede trascender lo más obvio», explica Kurle.

Esos resultados preliminares convencieron al Servicio de Fauna y Pesca de EE.UU. de la necesidad de exterminar a las intrusas de Hawadax con raticida, en colaboración con las organizaciones The Nature Conservancy e Island Conservation. Kurle y sus colaboradores obtuvieron fondos para efectuar censos al cabo de cinco y once años de la intervención. Constataron que el ecosistema intermareal de la isla se estaba recuperando gradualmente y que ahora es similar al de otras islas del archipiélago de las Aleutianas que nunca han sido invadidas por las ratas, con menos invertebrados marinos y una cobertura mucho mayor de laminarias gigantes.

«Muy pocos proyectos de desratización han prestado atención al impacto de los roedores en el ecosistema marino, así que el caso de la isla Hawadax destaca por esa razón», asegura Daniel Simberloff, ecólogo de la Universidad de Tennessee en Knoxville, ajeno al estudio. «Es un resultado excelente, elegante desde el punto de vista académico, pero, por supuesto, resulta también importante para la conservación.»

—Rachel Nuwer

---

nó que las alforjas habían sido elaboradas con agárico blanco (*Laricifomes officinalis*), un hongo xilófago que se encuentra en regresión en los bosques maduros del oeste de EE.UU. «Los pueblos indígenas apreciaban este yesquero. En la costa noroeste del Pacífico se usaba con fines medicinales y religiosos», asegura Blanchette. Según un antropólogo médico, la tribu spokane del estado de Washington empleaba tapetes de agárico en los portabebés para prevenir la dermatitis del pañal. Los leñadores del siglo pasado confeccionaban vendas con él y en la Grecia antigua era un remedio contra la tuberculosis. Estudios recientes indican que los extractos de agárico blanco poseen propiedades antibacterianas y antivíricas y que incluso podrían ser eficaces contra ciertos tipos de cáncer en animales.

Ninguna empresa de biomateriales usa actualmente los tapetes de micelios del agárico blanco, pero Blanchette afirma que se puede cultivar en el laboratorio, lo que convertiría a este hongo escaso en una opción viable para la confección de micotejidos. Además, Turner afirma que «es probable que haya más artefactos fabricados con este material que aguardan a ser descubiertos en museos y colecciones».

—Cypress Hansen

MEDICINA

Cultivo artificial de hueso

Se crea un nuevo modelo experimental de tejido óseo vivo

Los organoides cultivados en el laboratorio, diminutas masas de células que remedan la anatomía y las funciones de un órgano, están adquiriendo cada vez mayor relevancia en la investigación médica. Hace años que existen micromodelos del cerebro, de los pulmones y de otros órganos, pero los modelos del tejido óseo resultan muy difíciles de obtener. El hueso es tema aparte porque los diferentes tipos de células coexisten inmersos en una matriz extracelular, un entramado de colágeno y minerales sujeto a una remodelación continua. En los intentos anteriores de crear un organoide óseo no se había logrado imitar bien el modo en que las células óseas humanas se forman en paralelo con esa matriz y las interacciones con ella. Sin embargo, un equipo de investigación afirma ahora haber creado un modelo realista que ayudará a entender mejor diversas enfermedades de los huesos.

Un estudio publicado en *Advanced Functional Materials* presenta el primer organoide que incorpora una «visión unificada» de las primeras etapas de la osteogénesis (formación del hueso), según la autora principal Anat Akiva, bióloga celular en el Centro Médico de la Universidad Radboud. Ella y sus colaboradores descubrieron que si se aplica una fuerza mecánica que simule las tensiones que modelan los huesos en el cuerpo humano, es posible hacer que las células precursoras de la médula ósea se transformen en osteoblastos (productores de hueso) y en osteocitos (reguladores del crecimiento), que, juntos, fabrican todas las proteínas que necesitan para funcionar. El proceso ideado también propició el crecimiento de una matriz extracelular muy parecida a la del tejido óseo humano. Al cabo de cuatro semanas de cultivo, el resultado final es un cilindro en miniatura de tejido fibroso, el hueso inmaduro que acaba siendo sustituido por otra forma más madura en el cuerpo.

La nueva herramienta serviría para observar atentamente lo que sucede a escala molecular cuando el proceso de osteogénesis falla y provoca trastornos óseos que afectan a millones de personas en el mundo. Uno de ellos es la osteogénesis imperfecta, o «enfermedad de los huesos de cristal», un trastorno genético que debilita la matriz extracelular y causa cientos de fracturas espontáneas a lo largo de la vida. El cáncer óseo como el osteosarcoma también altera la formación del hueso y este nuevo modelo permitiría investigar la infiltración de las células tumorales en la matriz extracelular y la fabricación extemporánea de hueso que desatan.

Los organoides óseos también podrían ayudar a los médicos a crear tratamientos personalizados, opina Ralph Müller, subdirector del Instituto de Biomecánica en la ETH de Zúrich, que no ha participado en el estudio. Antes de diseñar el plan de tratamiento se cultivarán organoides a partir de muestras de tejido vivo del paciente para explorar cómo responderían sus huesos a diversas intervenciones.

«Contamos con un sistema fiable para fabricar tejido óseo, con el cual podremos afinar mucho, estudiar qué falla exactamente y averiguar si hay una solución», concluye Akiva.

—Anna Goshua



THOMAS FUCHS

QUÍMICA

Concentraciones ínfimas

Un nuevo método de detección de impurezas podría contribuir a la búsqueda de materia oscura

Una concentración de una parte en mil millones equivale a una pizca de sal en diez toneladas de patatas fritas. Ahora, los químicos han hallado un método para medir concentraciones de partículas radiactivas millones de veces más bajas. En un artículo publicado en *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, un equipo ha descrito un método que les permitió detectar el uranio y el torio radiactivos que se ocultaban entre mil billones de otros átomos.

Los elementos radiactivos se hallan de forma natural en el oro y otros metales usados a menudo en los instrumentos de laboratorio, y la posibilidad de identificar esas cantidades ínfimas podría tener repercusiones en física de partículas. Ello se debe a que las trazas radiactivas limitan la sensibilidad de los detectores que buscan partículas exóticas, como las que podrían constituir la materia oscura. Una minúscula impureza radiactiva en el seno de un detector puede producir una señal similar a la de tales partículas, lo que invalida los resultados.

«Lo primero que necesitamos son materiales lo más puros posible», subraya Michelle Dolinski, física de partículas de la Universidad Drexel y del Observatorio de Xenón Enriquecido (EXO) que no participó en el estudio. Su trabajo sobre desintegraciones exóticas se encuentra íntimamente relacionado con el de los químicos que rastrean la radiactividad.

«Las necesidades de la física impulsan la química», asegura Eric Hoppe, químico del Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (PNNL) y coautor del estudio. Él y sus colaboradores lograron detectar pequeñas concentraciones de torio y uranio radiactivos en muestras metálicas usando un espectrómetro de masas, que separa las partículas en función de su masa.

Lo primero que tuvieron que hacer los investigadores fue conseguir que los elementos radiactivos formaran compuestos más pesados que el resto de los átomos del metal, explica Khadouja Harouaka, autora principal y también química del PNNL. Para ello, calentaron una muestra metálica hasta que se tornó muy reactiva y después la introdujeron en una cámara llena de oxígeno. El torio o el uranio de la muestra se combinó entonces con el oxígeno, lo que generó moléculas lo bastante masivas como para distinguirlas en los datos del espectrómetro. Los científicos contaron esas partículas radiactivas oxidadas y calcularon su concentración original, lo que permite inferir cuánta radiación aportaría el material en los experimentos de física de partículas.

Muchos de los métodos de detección de partículas desarrollados hasta ahora deben modificarse para cada metal concreto. Sin embargo, la nueva técnica emplea siempre los mismos pasos de calentamiento y oxidación. «Eso pone a nuestra disposición toda una variedad de materiales», afirma Hoppe.

La elección de los materiales es fundamental en el diseño de los detectores, señala Priscilla Cushman, física de la Universidad de Minnesota y del experimento Búsqueda Criogénica de Materia Oscura (SuperCDMS) que no participó en el estudio. «En un experimento hay infinidad de pequeñas piezas con distintas funciones», detalla. «Todos los materiales que se utilizan en las conexiones eléctricas o térmicas, o incluso en el aislamiento, han de ser puros desde el punto de vista radiactivo.» Cada nuevo metal que se examine podría usarse en los componentes del detector. Hoppe también mira al futuro: «Siempre estamos tratando de eliminar todos los materiales [radiactivos] sospechosos, y este trabajo supone un gran paso adelante».

—Karmela Padavic-Callaghan



Cámara de mezcla del experimento SuperCDMS para la búsqueda de materia oscura.

PAUL BRINK, COLABORACIÓN SUPERCDMS, UNIVERSIDAD STANFORD Y LABORATORIO NACIONAL DE ACELERADORES SLAC

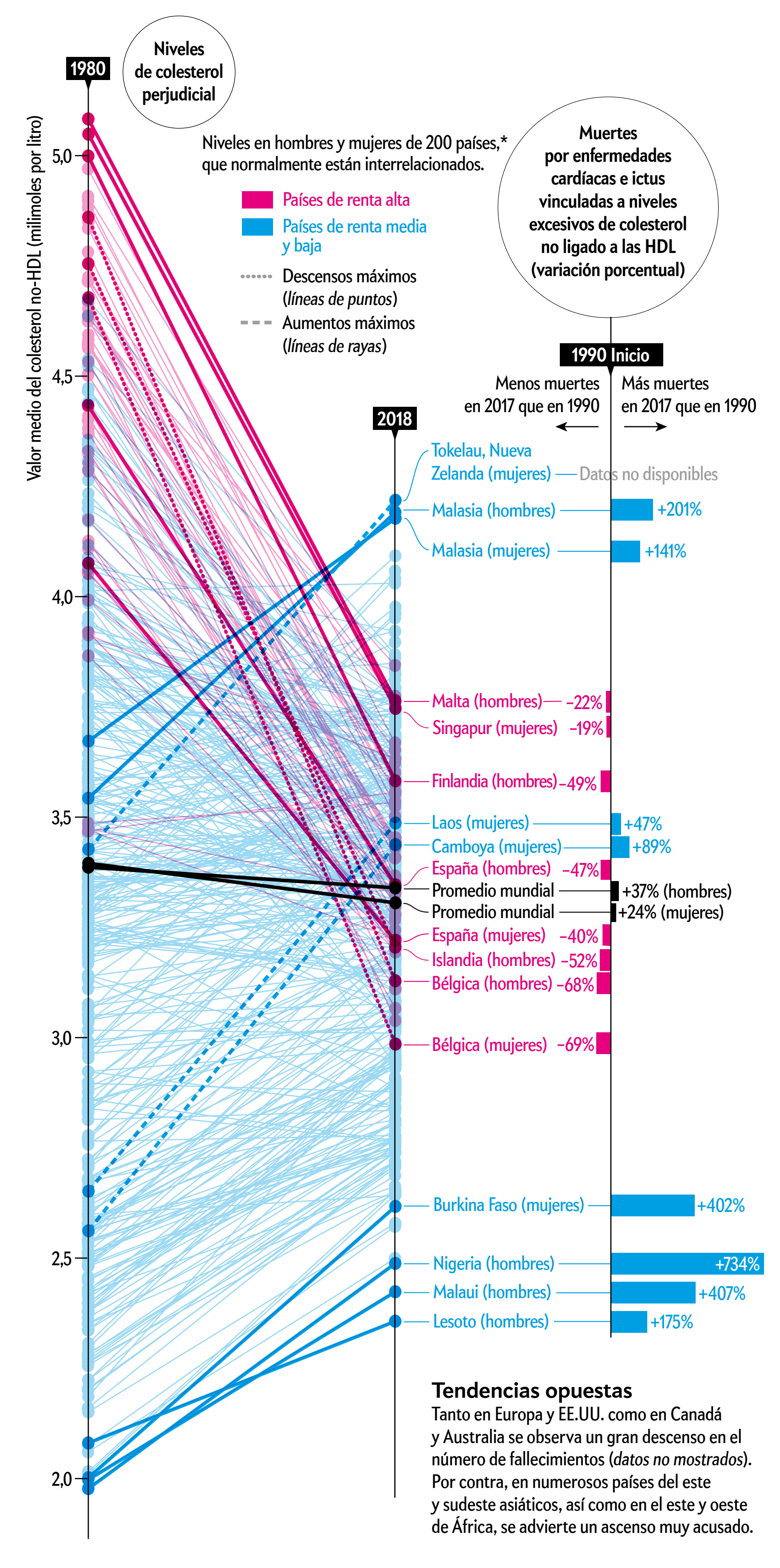
SALUD

El colesterol trueca de lugar

Los niveles en la sangre descienden en Occidente pero aumentan en Asia y África

El riesgo cardiovascular derivado de la acumulación en los vasos sanguíneos del colesterol nocivo se está desplazando de los países occidentales de rentas altas, sobre todo los europeos, a los de rentas medias y bajas, en especial del este y sudeste de Asia. Un metanálisis de 1127 estudios que abarca 102,6 millones de ciudadanos del planeta revela un notable descenso del colesterol perjudicial de 1980 a 2018 en países como Finlandia, Bélgica o EE.UU., y un fuerte alza en Tailandia, Malasia, Nigeria y Malawi. Dos factores determinantes en las poblaciones de rentas altas son la reducción del consumo de grasas saturadas y la generalización de los hipolipemiantes, sobre todo de las estatinas, afirma uno de los autores principales del estudio, Majid Ezzati, del Colegio Imperial de Londres. Por su parte, en las poblaciones de rentas bajas está aumentando el consumo de grasas saturadas y las estatinas no son habituales. Hace una década había pocos indicios de esta tónica, pero a Ezzati le ha sorprendido la rapidez con la que ha avanzado.

—Mark Fischetti



Tendencias opuestas

Tanto en Europa y EE.UU. como en Canadá y Australia se observa un gran descenso en el número de fallecimientos (*datos no mostrados*). Por contra, en numerosos países del este y sudeste asiáticos, así como en el este y oeste de África, se advierte un ascenso muy acusado.

Bueno y malo

El colesterol ligado a las lipoproteínas de baja densidad (colesterol de las LDL), el perjudicial o «malo», se acumula en el interior de las paredes de los vasos sanguíneos, estrecha las arterias y aumenta las probabilidades de sufrir un ictus o un ataque al corazón. En cambio, el ligado a las lipoproteínas de alta densidad (colesterol de las HDL), el saludable o «bueno», elimina el de las LDL, además de otras formas secundarias de colesterol nocivo. La determinación del colesterol de las LDL resulta difícil en los análisis, así que normalmente se mide el de las HDL y el no ligado a ellas como indicadores indirectos.

** Los datos conciernen únicamente a hombres o a mujeres. No se incluyen categorías que no sean binarias.*

FUENTE: «REPOSITIONING OF THE GLOBAL EPICENTER OF NON-OPTIMAL CHOLESTEROL», DE NCD RISK FACTOR COLLABORATION (NCD-RISC) EN *NATURE*, VOL. 582, JUNIO DE 2020; JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*)

GENÉTICA

El insólito ADN de los virus bacteriófagos

Los virus que infectan a las bacterias tienen enzimas especializadas para sintetizar genes con una nucleobase distinta

EWEN CALLAWAY



LOS VIRUS DE TIPO BACTERIÓFAGO, que en esta ilustración se muestran atacando a una célula bacteriana, pueden contener compuestos exóticos en el ADN.

GETTY IMAGES/PETERSCHREIBER/ISTOCK

No hace falta salir de la Tierra para encontrar genomas alienígenas. Algunos virus de los que infectan las bacterias utilizan un alfabeto genético alternativo que difiere del empleado por casi todos los demás organismos. Dos equipos están aportando detalles del funcionamiento de este sistema.

Tras más de cuatro décadas de gestación, los estudios demuestran que docenas de estos virus bacteriófagos (acortado como «fagos») incluyen en su genoma una nucleobase denominada 2-aminoadenina (abreviada como Z) en vez de adenina, la A que acompaña a las T, C y G de los manuales de genética.

En un artículo publicado en *Science*, la bióloga computacional Suwen Zhao y su equipo de la Universidad ShanghaiTech han descrito la síntesis del ADN con Z. «Desde hace mucho, los científicos soñamos con incrementar la diversidad de las nucleobases. Nuestro trabajo demuestra que la naturaleza ya había concebido cómo hacerlo.» Otros investigadores en Francia han publicado ideas parecidas en un par de artículos del mismo número de la revista.

A Steven Benner, experto en biología sintética y creador de la Fundación para la Evolución Molecular Aplicada en Alachua, Florida, el trabajo le parece trascendental y lo compara con el de Carl Woese, el microbiólogo estadounidense que descubrió una nueva rama de vida unicelular. «Representa el primer descubrimiento de una "biosfera oculta" desde que Woese identificara las arqueas hace medio siglo», comenta Benner.

Unión reforzada

Unos científicos de la Unión Soviética fueron los primeros en descubrir el ADN con Z a finales de los años setenta del siglo pasado en un fago de nombre S-2L que infecta a las bacterias fotosintéticas. Observaron que el ADN del fago se comportaba de un modo extraño cuando sus

dos hebras helicoidales se disociaban con calor. Lo habitual es que se necesite una temperatura mayor para romper la unión entre las nucleobases G y C que para romper la unión entre A y T, pero el ADN del fago se comportaba como si contuviera solo parejas de G y C. Los análisis subsiguientes del equipo soviético demostraron que en el fago se habían remplazado las A por Z, y que estas se unían con más fuerza a las T.

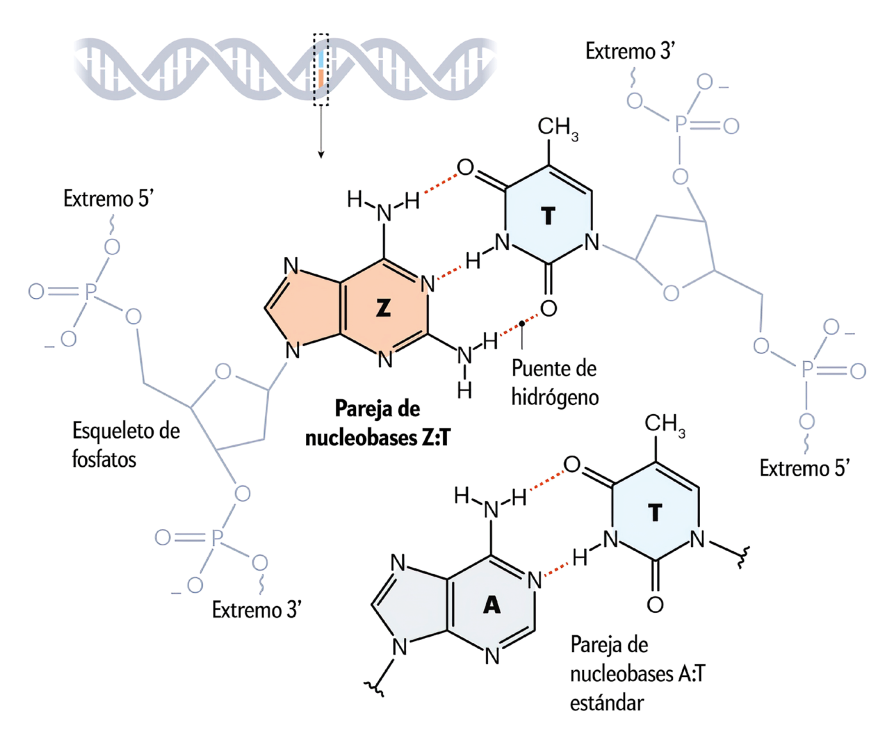
«Parecía algo transgresor», explica Philippe Marlière, inventor y genético en la Universidad de Évry, en las afueras de París, que ha liderado uno de los estudios de *Science*. ¿Por qué ese fago presentaba una nucleobase tan especial?

Los estudios posteriores demostraron que el genoma más abundante del S-2L era resistente a las enzimas que machacan el ADN del fago y a otras defensas que las bacterias esgrimen con destreza contra él. Pero se desconocía cómo se metían las Z en el ADN, o si era algo corriente. La inclusión de las Z es solo una entre las muchas modificaciones que se sabe que existen en el ADN de los fagos.

Para resolver estos interrogantes, un equipo dirigido por Marlière y Pierre-Alexandre Kaminski, bioquímico del Instituto Pasteur en París, secuenció el genoma del fago a principios del siglo xxi. Dieron con un gen que podría intervenir en una etapa de la síntesis del ADN con Z, pero no en otras. Como la secuencia no se parecía por entonces a nada de las bases de datos genómicas, el intento de desvelar los fundamentos del ADN con Z acabó en un callejón sin salida.

Aunque patentaron el genoma del fago S-2L, también lo hicieron público. Marlière continuó peinando las bases de datos genómicas hasta que, en 2015, apareció una coincidencia: un fago que infecta las bacterias acuáticas del género *Vibrio* albergaba un gen que concordaba con un tramo del genoma de S-2L. El gen codificaba una enzima que se asemejaba a una que las bacterias utilizan para sintetizar la adenina. «Fue un momento maravilloso», apunta Marlière.

En 2019, el equipo de Zhao halló otras coincidencias similares en las bases de datos. Ambos equipos demostraron que todos estos fagos tenían un gen denominado *PurZ* que codificaba una enzima crucial para las primeras etapas de la síntesis del nucleótido Z, que se fabricaba a partir de una molécula precursora presente en las células bacterianas. A continuación, completaron la vía metabólica gracias a otras enzimas codificadas en el genoma de las bacterias infectadas por los fagos.



GENOMA RESISTENTE: La nucleobase Z que remplaza la A en el alfabeto genético de determinados virus forma tres puentes de hidrógeno en vez de dos, lo que dificulta la separación de las dos hebras del ADN.

Pero seguía revoloteando una cuestión clave: las enzimas que los equipos habían identificado que producían el ingrediente bruto (una molécula de nombre dZTP) para sintetizar el ADN con Z no valían para explicar la inserción del dZTP en las hebras del ADN de los fagos ni la exclusión las nucleobases de tipo A (en forma de una sustancia de nombre dATP).

En este aspecto, las conclusiones de los equipos difieren ligeramente. En el genoma del fago de *Vibrio* hay un gen junto a *PurZ* que codifica una enzima denominada polimerasa. Esta enzima copia las hebras de ADN, y Marlière y Kaminski hallaron que incorpora el dZTP en el ADN a la vez que retira las nucleobases de tipo A que haya. Según Kaminski, «esto nos explicó por qué se excluían las A. Fue todo un logro».

Zhao considera que la historia no está completa. Su trabajo sugiere que se necesita otra enzima del fago, una que degrade el dATP intracelular y conserve el dZTP, porque ha visto que basta con incrementar la concentración de dZTP con respecto a la de dATP para engañar a la polimerasa propia de la célula para que sintetice un ADN con Z.

Faltan conexiones

Zhao resalta que «desconocemos muchas cosas». No está claro cómo se impide que las Z se incorporen en el ADN. Ni es evidente cómo se las apaña la maquinaria celular que lee el ADN para sintetizar las proteínas cuando el ADN contiene Z, porque su doble hélice tiene un aspecto ligeramente diferente al de las moléculas de ADN habituales. Kaminski añade que tampoco se conoce del todo cómo se copia el ADN con Z (se necesitarían enzimas especializadas además de la polimerasa). «Seguimos sin saber cómo funciona el sistema completo.»

Algunas enzimas del hospedador funcionan mejor y otras peor cuando trabajan sobre el ADN con Z, nos indica David Dunlap. Este biofísico de la Universidad Emory, en Atlanta, había observado que cierta enzima de *Escherichia coli* lo pasa mal cuando superenrolla y dobla esta doble hélice exótica. El descubrimiento de más fagos con Z en su ADN, así como de los genes que participan en la síntesis de Z, debería desvelar los beneficios que este tipo de ADN aporta a los fagos.

Para Zhao, tener estos genes a mano aceleraría las posibles aplicaciones del ADN con Z, al hacer más fácil y barata su fabricación. La robustez de este ADN haría que la técnica naciente de almacenamiento de datos en el ADN fuera más estable y duradera. Las nanomáquinas hechas de ADN con Z organizado con precisión (conocido como papiroflexia de ADN) podrían plegarse más rápido. El equipo francés está trabajando en la incorporación de Z en los genomas bacterianos. Marlière nos asegura que «tenemos células de *E. coli* "infestadas" de Z y no es tan tóxico como temíamos».

El trabajo de Benner ha ampliado el alfabeto genético para incluir varias nucleobases artificiales y espera que los nuevos estudios estimulen las investigaciones sobre lo poderosa que es la alteración del alfabeto genético. «El hecho de que la naturaleza haya dado un pequeño paso en la misma dirección podría ser la cafeína intelectual necesaria para conseguir que la comunidad de biólogos moleculares sea consciente de que se puede mejorar el ADN y, además, de manera beneficiosa», concluye el experto.

Ewen Callaway *es periodista especializado en biomedicina en* Nature.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 593, pág. 181, 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

A widespread pathway for substitution of adenine by diaminopurine in phage genomes. Yan Zhou et al. en *Science*, vol. 372, págs. 512-516, abril de 2021.

A third purine biosynthetic pathway encoded by aminoadenine-based viral DNA genomes. Dona Sleiman et al. en *Science*, vol. 372, págs. 516-520, abril de 2021.

Noncanonical DNA polymerization by aminoadenine-based siphoviruses. Valerie Pezo et al. en *Science*, vol. 372, págs. 520-524, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un siglo de bacteriófagos. Forest Rohwer y Anca M. Segall en *IyC*, abril de 2016.

Un archivo universal que cabría en un huevo. James E. Dahlman en *IyC*, enero de 2020.

TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD

La energía nuclear, diez años después de Fukushima

Ante la acuciante necesidad de descarbonizar el sistema energético, la industria que suministra la décima parte de la electricidad mundial debe consultar a la opinión pública sobre investigación, diseño, regulación y residuos

ADITI VERMA, ALI AHMAD Y FRANCESCA GIOVANNINI

Han transcurrido diez años desde que un catastrófico terremoto y el consecuente tsunami dañaran la central nuclear japonesa de Fukushima Daiichi y provocaran el peor accidente nuclear desde el de Chernóbil, acaecido en 1986. El desastre de Fukushima golpeó en un momento de renovada esperanza e infundado optimismo sobre una nueva oleada de tecnología nuclear y la labor que esta podría desempeñar en un futuro con bajas emisiones de carbono. Pero el accidente condujo a una racionalización del gasto, la cual ha tenido lugar en medio de una preocupación creciente sobre las vulnerabilidades técnicas, institucionales y culturales de las instalaciones nucleares, así como sobre la falibilidad humana en lo concerniente al diseño, la gestión y el funcionamiento de sistemas tan complejos. Un decenio después, cuando la crisis climática parece cada vez más cercana, estos serios interrogantes aún persisten.

No pocos académicos sostienen que la energía nuclear constituye una opción inevitable para limitar el calentamiento global. Sin embargo, dadas las preocupaciones ambientales y sociales, otros se muestran más circunspectos o continúan oponiéndose. En su informe especial de 2018, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) reconoció el posible papel de la energía nuclear para atajar el aumento de las temperaturas globales. Sin embargo, también destacó la importancia que tendrá su aceptación pública a la hora de impulsar o frenar las inversiones.

La seguridad y el coste suelen señalarse como los principales retos de la industria nuclear. Los nuevos reactores están abordando estas cuestiones, pero es posible que no sean comercialmente viables hasta mediados de siglo, un plazo que podría dejarlos obsoletos a medida que otras alternativas, como la energía solar y la eólica (junto con el almacenamiento), consolidan su dominio.

Desde nuestra perspectiva, existe un problema aún mayor: la forma opaca, cerrada en sí misma y poco equitativa en la que, desde hace largo tiempo, el sector nuclear ha venido tomando las decisiones técnicas y políticas. Por tanto, creemos necesario plantear dos preguntas clave sobre su futuro. En primer lugar, ¿puede y podrá el sector superar la desaprobación de la opinión pública? Y en segundo, ¿compensan sus beneficios los riesgos y el coste para la sociedad y el entorno?

Para poder avanzar, la industria nuclear deberá afrontar estas cuestiones. Ello requerirá un cambio fundamental de perspectiva y un giro hacia iniciativas más inclusivas, transparentes, responsables y con visión de futuro.

Cómo hemos llegado hasta aquí

Durante los años cincuenta y sesenta del siglo pasado, la expansión de la energía nuclear se antojaba imparable. Los responsables políticos y los promotores vaticinaron que llegaría a ser «tan barata que sería imposible facturarla». Sin embargo, durante los años ochenta y noventa, las inversiones se redujeron de manera notable. El creciente sentimiento antinuclear, alimentado por los accidentes de Three



GETTY IMAGES/MICHAELUTECH/ISTOCK

LA ESTRATEGIA DE COMPROMISO con la sociedad adoptada por la industria nuclear ha derivado en una división antagónica entre expertos y opinión pública. Para poder avanzar, el sector deberá poner sobre la mesa varias cuestiones que hasta ahora han quedado olvidadas.

Mile Island (1979) y Chernóbil (1986), sumado a un aumento en los costes de construcción y a una pérdida de las subvenciones estatales, condujo a un periodo de estancamiento.

Las proyecciones realizadas en los años setenta por el Organismo Internacional de la Energía Atómica calculaban que, en 1990, las instalaciones nucleares producirían 430 gigavatios (GW) de electricidad, o el 12 por ciento de la capacidad mundial de generación eléctrica. Y que, en el año 2000, esa cifra ascendería a entre 740 y 1075 GW, o el 15 por ciento de la capacidad generadora. En 1999, sin embargo, el sector solo había llegado a un tercio de esa cifra, con 308,6 GW de capacidad. A finales del siglo xx, las expectativas mundiales de un renacimiento nuclear comenzaron a crecer, y hacia 2010 la construcción de nuevas centrales había repuntado.

Entonces ocurrió el accidente de Fukushima. Junto con otros factores económicos y políticos, la catástrofe impulsó el desmantelamiento del complejo nuclear en varios países. Cuatro meses después del accidente, el Parlamento alemán aprobó el apagón nuclear del país para 2022. En la misma línea, el Gobierno suizo instó a la retirada de los cinco reactores de la nación. En Japón, de los 54 reactores que estaban operativos en el momento del desastre, 12 se clausuraron de manera definitiva y, al menos por ahora, 24 siguen cerrados.

En Estados Unidos, la Comisión Reguladora Nuclear revisó el funcionamiento de las centrales nucleares del país. La evaluación suscitó preocupaciones en materia de seguridad, si bien la nación mantiene su compromiso con la energía nuclear. Al mismo tiempo, otros países reanudaron sus programas nucleares o dieron los primeros pasos hacia su implantación.

Hoy se están construyendo unos 50 reactores nucleares en 16 países. China encabeza la lista con 16 centrales en desarrollo, seguida de la India y Corea del Sur. Según el Informe sobre el Estado Mundial de la Industria Nuclear (WNISR, por sus siglas en inglés), a finales de febrero de 2021 había 414 reactores en funcionamiento en 32 países, los cuales proporcionaban el 10,3 por ciento del suministro eléctrico mundial. En términos globales, la energía nuclear continúa su crecimiento, aunque no sin dificultades. El WNISR, por ejemplo, retrata una industria en buena parte estancada.

Mientras tanto, muchos describen la energía nuclear como una parte ineludible de la solución al cambio climático. El desarrollo de nuevas tecnologías constituye uno de los pilares de este argumento. Los reactores modulares pequeños, por ejemplo, producen menos de 300 MW por unidad, lo suficiente para abastecer a unos 200.000 hogares de un país como Estados Unidos. Pero su tamaño reduce el riesgo de accidentes, al tiempo que permite estandarizar el diseño y abaratar potencialmente los costes.

En Estados Unidos, algunos reactores de este tipo se están acercando a su viabilidad comercial. En 2020, el modelo de la empresa NuScale se convirtió en el primero en recibir la aprobación una vez completada la evaluación de seguridad, y se prevé que su primera planta entre en funcionamiento en 2030 en Idaho. Otras empresas trabajan en una nueva generación de reactores más eficientes y seguros, conocidos como reactores de generación IV. Con todo, su comercialización se antoja más lejana aún.

MANIFESTACIÓN ANTINUCLEAR celebrada en Ámsterdam el 16 de abril de 2011, pocas semanas después del accidente de Fukushima.

GETTY IMAGES/VLIET/ISTOCK

Compromiso social

Todos estos desarrollos son interesantes. Sin embargo, gran parte del apoyo a la energía nuclear se centra casi exclusivamente en sus características tecnoeconómicas, mientras que se resta importancia a cuestiones morales y éticas que permanecen sin resolver. A menudo, sus defensores pasan por alto las desigualdades originadas por el modo en que los beneficios y los riesgos de esta tecnología se reparten a escala local, regional y mundial. Y, de igual manera, tampoco suelen considerar quién se queda fuera del proceso de toma de decisiones sobre qué construir, ni quién se verá más afectado por los problemas que pudieran aparecer.

Por ejemplo, casi tres cuartas partes de la producción mundial de uranio proceden de minas situadas en comunidades indígenas o en sus inmediaciones, como sucede en Estados Unidos o Australia. Estas minas, abandonadas después de su explotación, han contaminado tierras y pueblos y han transformado los modos de vida tradicionales. Los residuos nucleares también deberán hacer frente a problemas parecidos, ya que es probable que los depósitos a largo plazo acaben ubicados lejos de las comunidades que tradicionalmente más se han beneficiado de la producción de electricidad nuclear. La industria suele presentar el problema de los residuos como uno con soluciones técnicas conocidas. Sin embargo, la cuestión de exactamente dónde y cómo serán almacenados los residuos sigue generando grandes controversias.

En marcado contraste, los «nuevos acuerdos verdes» propuestos en diversos países aspiran de manera explícita a la redistribución de la riqueza, la justicia social y la equidad medioambiental. En Estados Unidos y otros lugares en los que se han suscitado estos debates, el apoyo público a la energía nuclear es tibio.

El sector nuclear ha fracasado una y otra vez a la hora de responder de manera contundente a las inquietudes de la sociedad. Este fracaso se remonta a los años sesenta y setenta. En aquella época, los estudios psicológicos describían al público como afectivo, irracional y con tendencia a ignorar las probabilidades a la hora de evaluar los riesgos. Como consecuencia, la industria nuclear debería elegir entre dos posibilidades: bien adaptar sus diseños a la percepción pública del riesgo, o bien educar a la sociedad.

La industria se decantó por la segunda opción. Pero, por lo general, solo intentó conectar con el público en las etapas finales del proceso de regulación, centrándose en difundir su propia percepción del riesgo. Esta emana de una ecuación que multiplica la probabilidad de que ocurra un desastre por sus consecuencias. Pero, a menudo, se evita o se excluye la perspectiva del público. Por ejemplo, muchas personas están dispuestas a aceptar riesgos voluntarios o habituales (como volar, fumar o conducir un automóvil), pero son refractarias a aquellos riesgos desconocidos y sobre los que no tienen ningún control. En el caso de las actividades que conllevan un riesgo involuntario, la mayoría de las personas tienden a quitar peso a las probabilidades y, para sentirse cómodas, exigen mayores niveles de seguridad y de protección.

La estrategia de compromiso con la sociedad adoptada por la industria nuclear ha derivado en una división antagónica entre expertos y opinión pública. Fukushima, por ejemplo, dejó una marca innegable en la psique colectiva. Sin embargo, la industria ha restado importancia a la catástrofe basándose en que el accidente no causó ni una sola víctima mortal directa. No obstante, los trastornos provocados en el modo de vida, en los vínculos sociales y en los ecosistemas han sido importantes. Se calcula que en su momento fue necesario desplazar a 165.000 personas. Y que, una década después, 43.000 individuos siguen sin poder regresar a su lugar de origen. Las evaluaciones del riesgo realizadas por la industria plasman las repercusiones económicas de esta situación, pero fallan en lo referente a los daños colaterales causados en la vida de las personas y en el entorno, los cuales resultan más difíciles de cuantificar.

Desde la minería del uranio hasta la gestión de los residuos, creemos necesario un compromiso auténtico con la ciudadanía cuyo objetivo radique en escuchar, no en convencer.

Diferentes vías

Por supuesto, los problemas derivados de las desigualdades en las cargas ambientales y sociales no son exclusivos del sector nuclear. La extracción de litio destinado a tecnologías renovables y el reciclaje de productos electrónicos, por ejemplo, plantean cuestiones similares. Sin embargo, otras industrias han sabido conectar mejor con la sociedad, y otros ámbitos de la ingeniería han virado hacia diseños más centrados en las personas. Los fabricantes de placas solares, por ejemplo, se han volcado en las necesidades reales del usuario final. Este enfoque ha propiciado el diseño de paneles solares semitransparentes que permiten a los agricultores cultivar bajo ellos, lo que ha dado lugar al nuevo campo de la energía «agrovoltaica».

La industria nuclear se enfrenta a una barrera particular a la hora de democratizar su tecnología. Los grandes reactores nucleares no se adaptan a los modelos colectivos que están prosperando en el ámbito de algunas energías renovables. Con todo, sí se vislumbran indicios de pensamiento creativo. Por ejemplo, el Centro Nacional de Innovación de Reactores de Estados Unidos, fundado en 2019, ha comenzado a investigar la manera en que perciben el riesgo las comunidades locales en las que podrían ubicarse los reactores avanzados.

Las nuevas generaciones de ingenieros, así como varias empresas emergen-

tes financiadas por la Oficina de Energía Nuclear del Departamento de Energía de Estados Unidos, han comenzado a explorar qué clase de reactores podrían ganarse el apoyo de la opinión pública. Con el accidente de Fukushima en mente, este planteamiento ha impulsado una reflexión más creativa sobre la seguridad y los riesgos. Y algunos diseñadores aseguran haber concebido reactores que no podrían sufrir una fusión del núcleo ni liberar grandes cantidades de radiactividad.

No estamos defendiendo que sea el público quien diseñe los reactores nucleares. Sin embargo, sí creemos que la manera en que el público percibe el riesgo debería tenerse en cuenta en las primeras fases del proceso de diseño, así como a la hora de tomar decisiones relativas a la gestión de emergencias y a la actuación e improvisación humanas. Y, por supuesto, la sociedad debería tener voz a la hora de decidir sobre la implantación de nuevos reactores y, llegado el caso, dónde y cómo ubicarlos.

Un futuro inclusivo

La falta histórica de un verdadero compromiso con la sociedad también ha conducido a la «captura regulatoria»: el uso de medios gubernamentales para favorecer los intereses de la industria. Es un error muy extendido pensar que tales prácticas solo imperan en países en desarrollo y con instituciones débiles. Esto es falso. En mayor o menor grado, se hallan presentes en casi todos los sitios.

Por ejemplo, la captura regulatoria por parte de la industria nuclear de la entonces Autoridad de Seguridad Nuclear japonesa está ampliamente considerada como una causa institucional del accidente de Fukushima. Incluso en los Emiratos Árabes Unidos, presentados a menudo por la industria nuclear como un modelo de libro, la entidad privada que desarrolló el plan estratégico para comercializar la energía nuclear asesora al regulador del país, lo que supone un claro conflicto de intereses.

Varios países con una industria nuclear asentada, como Estados Unidos, China y Rusia, se están posicionando como proveedores mundiales de tecnología nuclear. El impulso para implantar programas nucleares en países con una gobernanza frágil, como Nigeria, Vietnam o Arabia Saudí, debería tratarse con cautela. No estamos cuestionando su derecho a producir energía nuclear, sino preguntándonos si se encuentran preparados para ello. Quienes abogan por el desarrollo nuclear en dichos países deberían también ofrecer su apoyo para ayudarles a erigir las instituciones necesarias, no limitarse a los contratos de venta de tecnología. Por desgracia, el fortalecimiento regulatorio recibe escasa atención y recursos.

En numerosos casos en todo el mundo, las decisiones para instaurar programas nucleares son tomadas por un pequeño círculo político y sin llevar a cabo una evaluación real de las necesidades del país, sin entender cómo encaja la energía nuclear en la política energética nacional o sin tener en cuenta la percepción pública sobre esta tecnología y sus riesgos. Por lo general, las distintas empresas han dado por hecho que los nuevos países compradores tendrán poco interés en el proceso de diseño y desarrollo, o que, llegado caso, tendrán poco que aportar. Eso hace que la adopción de la energía nuclear parezca forzada y estimulada por el afán de beneficios de la industria, no porque constituya un componente orgánico de una respuesta colectiva a un problema social como el cambio climático.

Si queremos que la energía nuclear desempeñe un papel significativo en el proceso de descarbonización, será necesario poner encima de la mesa las cuestiones relativas al diseño, desarrollo y regulación que hasta ahora han quedado olvidadas.

Aditi Verma, Ali Ahmad *y* ***Francesca Giovannini*** *son miembros del Proyecto para el Manejo del Átomo (PMA) de la Escuela de Gobernanza John F. Kennedy de Harvard.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 591, págs. 199-201, 2021. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Social benefit versus technological risk. Chauncey Starr en *Science*, vol. 165, págs. 1232-1238, septiembre de 1969.
US nuclear power: The vanishing low-carbon wedge. M. Granger Morgan et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, págs. 7184-7189, julio de 2018.
The World Nuclear Industry Status Report 2020. Mycle Schneider et al. WNISR, septiembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Prepararse para el cisne negro. Adam Piore en *IyC*, agosto de 2011.
El nuevo imperio nuclear ruso. Eve Conant en *IyC*, diciembre de 2013.
El impacto ecológico de la catástrofe de Fukushima. Steven Featherstone en *IyC*, junio de 2015.

COGNICIÓN ANIMAL

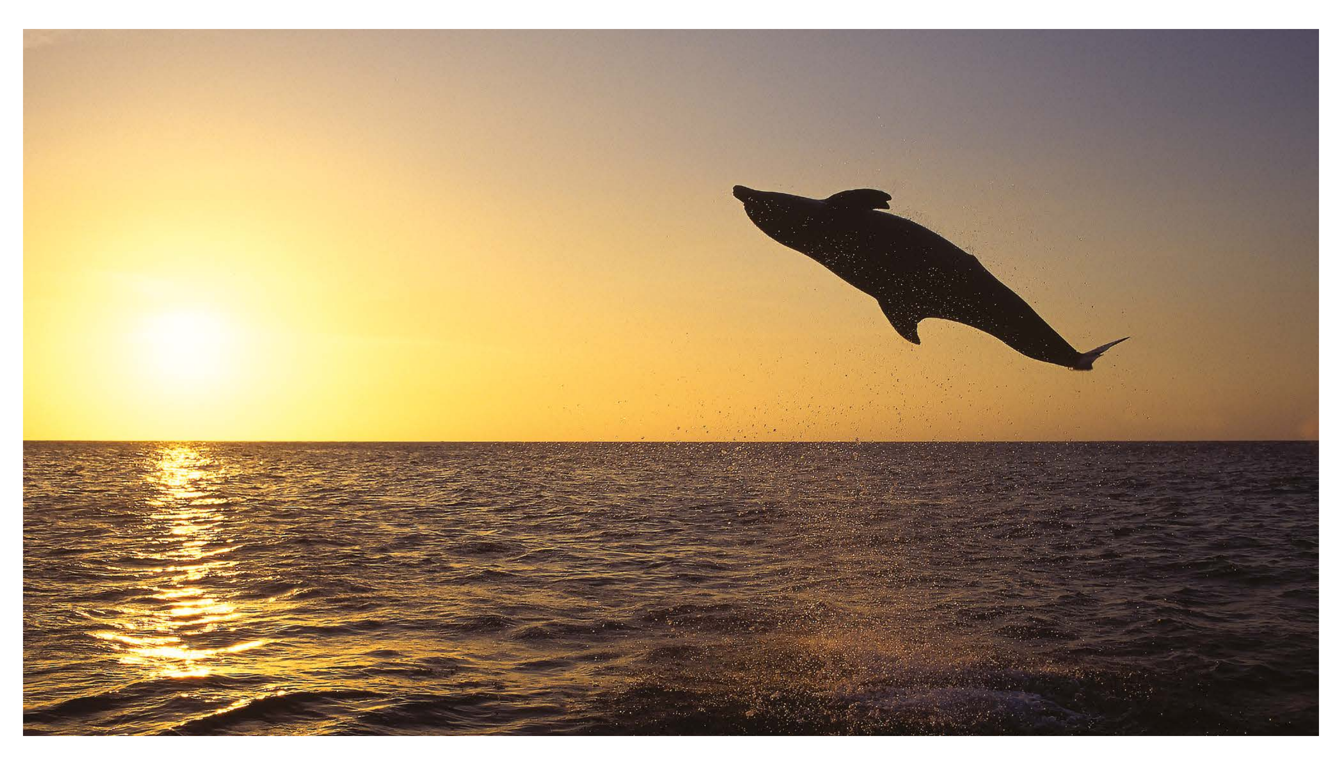
¿Los delfines son diestros o zurdos?

El estudio de las preferencias de giro en este cetáceo ha revelado un sesgo propio de la percepción humana

KELLY JAAKKOLA

El ser humano no actúa simétricamente. La mayoría de la gente se desenvuelve mejor con una mano que con la otra o mantiene mejor el equilibrio sobre una pierna que sobre la otra. Y aquellos que dan giros sobre sí mismos, como los gimnastas, los bailarines o los buceadores, lo hacen preferentemente en un sentido o en otro.

El cerebro tampoco opera de modo simétrico. Esta idea ha arraigado en la psicología popular con la clasificación de las personas según la supuesta dominancia del hemisferio izquierdo (pensamiento analítico) o el derecho (pensamiento creativo). Aunque esta visión «psicopop» descansa en datos discutibles, la idea subyacente del funcionamiento asimétrico del



¿DERECHA O IZQUIERDA? Los expertos han discrepado inconscientemente sobre la forma de interpretar los giros tridimensionales del delfín.

WW PICS UNIVERSAL IMAGE GROUP Y GETTY IMAGES

cerebro, que los entendidos llaman lateralidad, está consolidada. Sirvan como ejemplos que el procesamiento del lenguaje radica en el hemisferio izquierdo y el de la información espacial en el derecho.

Puesto que cada hemisferio controla el lado opuesto del cuerpo, el estudio de los comportamientos asimétricos ofrece información acerca del funcionamiento asimétrico del órgano pensante. De ahí que la investigación sobre este aspecto en los animales pueda brindarnos datos sobre la evolución del cerebro.

Lateralidad sin manos

Sin duda, el tipo de lateralidad más familiar para nosotros es el uso dominante de la mano derecha o la izquierda en las actividades cotidianas. La cualidad de ser diestro o zurdo ha sido estudiada en el mundo animal mediante la observación de aspectos tales como la mano con la que los monos suelen asir los objetos, la garra con la que los perros extraen alimento de un recipiente, etcétera. Pero ¿qué se puede hacer cuando el animal estudiado no posee ni manos ni garras? ¿Cómo se estudia la lateralidad en especies como el delfín?

Las asimetrías del comportamiento no solo radican en las extremidades, sino que adoptan formas diversas, puesto que también pueden ser sensitivas, como el mejor o peor desempeño en tareas diferentes según el ojo o el campo visual que empleemos, o los sesgos de giro, por los que se prefiere girar más en una dirección que en otra.

Dado que los diversos tipos de sesgo obedecen a causas diferentes, cuantos más tipos de comportamientos estudiemos en múltiples animales, más completa será nuestra visión de la lateralidad del cerebro y de su evolución.

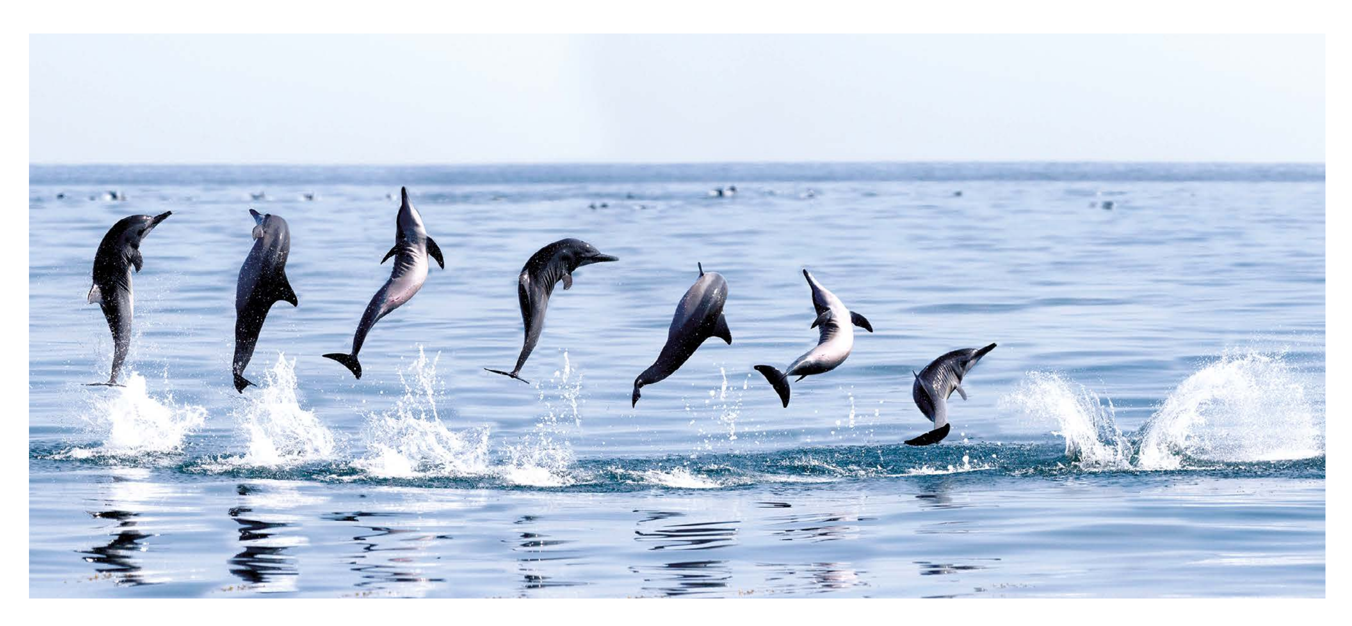
Un nuevo giro a los virajes

Aquí es cuando las cosas se complican. A la hora de comparar las especies zoológicas hay que tener en cuenta las diferencias anatómicas y locomotoras. Mientras que en los animales bípedos, como la especie humana o las aves, el eje longitudinal del cuerpo es vertical, en los cuadrúpedos es horizontal. Esto significa que la acción de girar entraña movimientos de tipo muy distinto en unos y otros. En el cuadrúpedo, el giro implica virar el eje longitudinal del cuerpo hacia un lado o el otro. En el bípedo, el cuerpo, que se mantiene erguido, gira sobre sí mismo a lo largo del eje longitudinal. Y en animales como el delfín, que se desplaza en un espacio tridimensional, es posible cualquiera de ambos.

Cuando nuestro equipo de investigación emprendió el estudio de la lateralidad en este cetáceo, tuvimos sumo cuidado en diferenciar ambos tipos de giro, pero incurrimos en otro problema cuando comenzamos a discrepar sobre lo que era un giro «a la derecha» (o a la izquierda). Tras largas deliberaciones (y algunas discusiones), nos dimos cuenta de que habíamos tropezado con un rasgo peculiar de la percepción humana. Aparentemente, nuestra especie interpreta la dirección de giro de modo distinto según la orientación del animal.

Para entender el meollo del asunto, haga lo siguiente: en primer lugar, póngase en pie y gire a la «derecha». Luego, túmbese en el suelo boca abajo y ruede hacia la «derecha». Si actúa como la mayoría de la gente, en el primer caso el hombro derecho se desplazará hacia su espalda, mientras que en la posición horizontal ese mismo hombro se moverá hacia el pecho, o el lado frontal. Es decir, girará exactamente en el sentido contrario. (Y, por si acaso se lo pregunta: el problema tampoco es resoluble describiendo los giros en el sentido de las agujas del reloj [horario] o en el sentido contrario a ellas [antihorario], en lugar de a la derecha o a la izquierda. Sustituya «derecha» por «en sentido horario» en los ejemplos anteriores y verá que el resultado no varía.)

Hasta la fecha, en casi todos los estudios científicos que habían abordado la



TONY WU NATURE PICTURE LIBRARY Y ALAMY

EL ESTUDIO de los comportamientos asimétricos en los delfines ha puesto en evidencia la necesidad de adoptar un nuevo sistema para la clasificación de los giros que estos cetáceos hacen sobre sí mismos.

lateralidad en los movimientos de giro, se había tomado como probando a una sola especie y una única orientación, como los giros en bipedestación en el ser humano (vertical) o los saltos al aire o rompeduras de las ballenas (horizontal), de modo que este problema nunca había aflorado. Sin embargo, esto significa que realmente en los estudios publicados se ha hecho uso de sistemas de clasificación contrarios para animales distintos dependiendo de su orientación. Un giro sobre sí mismo en que el lado derecho del animal se desplaza hacia adelante se clasifica normalmente como a la izquierda (o antihorario) en los estudios con personas y aves que caminan; pero, en cambio, se clasifica como a la derecha (u horario) si los estudiados son delfines u otros cetáceos. Salta a la vista que el análisis de la lateralidad del giro en especies diferentes exige consensuar primero la dirección del giro, lo que hace necesario adoptar un sistema nuevo.

El sistema que hemos ideado está inspirado en la «regla de la mano derecha» del electromagnetismo, que tantos de nosotros aprendimos en la asignatura de física que cursamos en el instituto o la universidad. Según esta regla, cuando el pulgar derecho apunta en la misma dirección en que la corriente eléctrica circula por un cable, la curvatura de los demás dedos de la mano indica la dirección del campo magnético que envuelve el cable. Nosotros adoptamos la descripción general de este modelo gráfico para crear el nuevo sistema de clasificación del giro, con los dedos a la derecha (RiFS, del inglés) o los dedos a la izquierda (LeFS): cuando el pulgar se mantiene estirado en paralelo al eje longitudinal del animal con la yema señalando a la cabeza, los demás dedos indican el sentido de giro. Esto nos permitió clasificar con facilidad y de manera inequívoca los giros, sin importar la orientación ni la dirección del movimiento del animal.

Las ventajas de una perspectiva renovada

En algunos artículos precedentes se afirmaba que los delfines mostraban una fuerte asimetría diestra en su comportamiento, similar a la humana, de la cual se deducía una especialización localizada en el hemisferio izquierdo. Pero dado que «derecha» no siempre significa lo mismo en los sistemas de clasificación ideados hasta ahora, no estaba claro que tal aseveración fuese realmente cierta. Para someterla a prueba, examinamos varias asimetrías conductuales en un grupo de 26 delfines, intentando responder a preguntas como: ¿en qué sentido nadan en el delfinario?, ¿con qué lado del cuerpo tocan las cosas? o ¿en qué sentido giran cuando saltan y se sumergen hacia un lado? Mientras nos asegurábamos de diferenciar claramente los distintos tipos de movimiento y gracias al nuevo sistema de clasificación inequívoco RiFS/LeFS, al final descubrimos que los delfines no poseen una asimetría general de carácter diestro, como se había afirmado.

La gente suele pensar que el progreso científico tiene lugar cuando se descubre algo nuevo que no se conocía. Pero existe otro tipo de avances que se producen cuando alguien encuentra un defecto en el modo de observar las cosas hasta ese momento. En estos casos, dar con una forma distinta permite ver las cosas con mayor claridad. Y como dijera en una ocasión el escritor de ciencia ficción Isaac Asimov: «La expresión más emocionante que se puede escuchar en ciencia, aquella que anuncia nuevosdescubrimientos, no es "¡Eureka!" sino "qué curioso"».

Kelly Jaakkola, *psicóloga cognitiva y especialista en mamíferos marinos, es directora científica del Centro de Investigación de Delfines de Cayo Grassy, en Florida.*

PARA SABER MÁS

Do dolphins really have a rightward lateralization for action? The importance of behavior-specific and orientation-neutral coding. Kelly Jaakkola et al. en *Behavioural Brain Research*, vol. 401, artículo n.º 113083, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Laterización del cerebro. P. F. MacNeilage, Lesley J. Rogers y G. Vallortigara en *IyC*, septiembre de 2009.
La inteligencia de los delfines. Fabienne Delfour en *MyC*, n.º 105, 2020.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

EL MISTERIO DEL MUON

El hermano masivo del electrón ha estado durante años en el centro de un enigma experimental y teórico. Un resultado reciente sobre sus propiedades magnéticas ofrece una de las vías más prometedoras para descubrir nueva física

Lucius Bushnaq, Gregorio Herdoíza y Marina Krstić Marinković

EN SÍNTESIS

El electrón y su versión masiva, el muon, actúan como pequeños imanes que reaccionan ante la presencia de campos magnéticos. Dicho comportamiento depende de una propiedad de estas partículas conocida como momento magnético.

Al contrario que otras propiedades, como la masa o la carga, el momento magnético de una partícula puede predecirse mediante un complejo cálculo teórico. Históricamente, su estudio fue clave para establecer la física de partículas moderna.

Un experimento ha hallado una discrepancia entre el momento magnético del muon y su predicción teórica. Sin embargo, un cálculo alternativo basado en tratar el espaciotiempo como formado por «píxeles» sugiere un acuerdo entre teoría y experimento.

LAS PARTÍCULAS VIRTUALES asociadas al vacío cuántico dictan el modo en que un muon (*azul, representación artística*) interacciona con un campo magnético. Medir con detalle dicha interacción podría aportar pruebas sobre la existencia de nuevas partículas elementales en la naturaleza.

Lucius Bushnaq es físico teórico de partículas del Trinity College de Dublín. Su investigación se centra en mejorar los métodos estadísticos usados en cromodinámica cuántica en el retículo.

Gregorio Herdoíza es físico teórico de partículas de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y el Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la UAM y el CSIC. Estudia las interacciones fuertes mediante técnicas de cromodinámica cuántica en el retículo y su relación general con el modelo estándar.

Marina Krstić Marinković es profesora de física computacional en el Instituto Politécnico de Zúrich. Trabaja en simulaciones de cromodinámica y electrodinámica cuántica en el retículo para explorar las posibles diferencias entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales.



EL PASADO 7 DE ABRIL

estaba marcado en los calendarios de miles de físicos de partículas de todo el mundo. Ese día, una videoconferencia desde el Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), cerca de Chicago, iba a anunciar los primeros resultados de un experimento largamente esperado.

El experimento, llamado Muon *g* – 2, había sido concebido para medir con una precisión exquisita cierta propiedad magnética del muon, una partícula elemental casi idéntica al electrón pero unas 200 veces más masiva. Había mucho en juego, ya que el magnetismo del muon ha sido considerado desde hace años uno de los candidatos más prometedores para revelar una grieta en el modelo estándar, la teoría que describe el comportamiento de todas las partículas elementales conocidas y sus interacciones salvo la gravedad.

El modelo estándar cuenta con un legendario historial de haber superado todas y cada una de las pruebas experimentales a las que se ha visto sometido. Sin embargo, sabemos también que no puede ser la teoría final de la naturaleza. Entre otras cosas, no incluye la gravedad y tampoco explica fenómenos como el de la materia o la energía oscuras. Por ello, encontrar un fallo en el modelo estándar (es decir, un desacuerdo concluyente entre un resultado experimental y las predicciones de la teoría) es considerado desde hace tiempo el santo grial de la física de partículas: un punto de partida que permitiría tirar del hilo para llegar a una teoría más fundamental del universo.

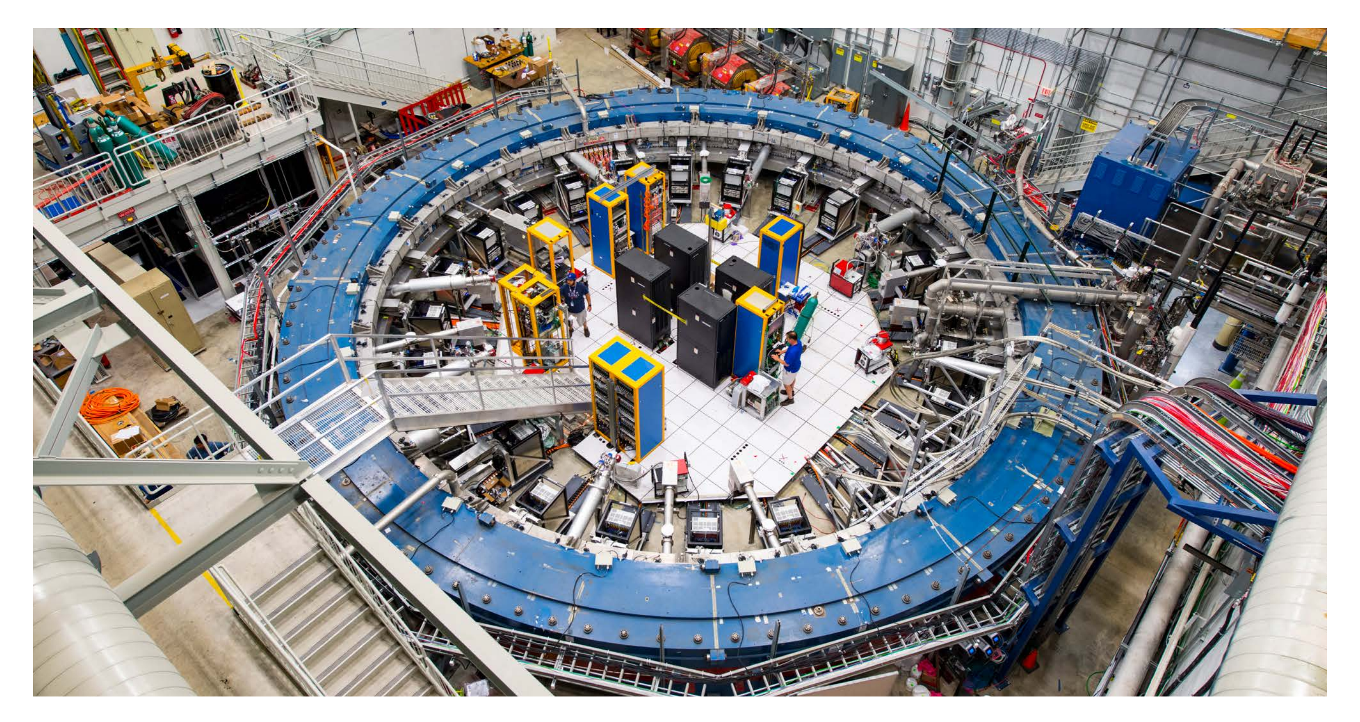
Los resultados de Muon *g* – 2 llegaban dos décadas después de que su predecesor, el experimento E821 del Laboratorio Nacional de Brookhaven, cerca de Nueva York, hubiera encontrado una tentadora discrepancia entre las propiedades magnéticas del muon y la predicción del modelo estándar. Sin embargo, dicha predicción teórica resulta extremadamente difícil de calcular, por lo que quedaban muchas preguntas abiertas.

Durante los veinte años transcurridos entre los resultados de Brookhaven y los del Fermilab, numerosos físicos teóricos de todo el mundo trabajaron para mejorar las técnicas de cálculo y afinar todo lo posible la predicción del modelo estándar. La inminente llegada del experimento Muon *g* – 2 dio un enorme impulso a ese esfuerzo global y, en diciembre de 2020, este cristalizó en la publicación de un «valor de consenso» para la predicción teórica del magnetismo del muon. Según dicho cálculo, la discrepancia entre la teoría y los resultados experimentales obtenidos en Brookhaven seguía existiendo.

El resultado anunciado en Fermilab el pasado 7 de abril ratificó el de Brookhaven. Las implicaciones eran de primer orden. Por un lado, la nueva medición daba un espaldarazo a las técnicas experimentales empleadas. Pero, además, la combinación de ambos resultados permitió obtener una medición aún más precisa del magnetismo del muon. En total, la discrepancia entre la teoría y el experimento ascendía a 4,2 sigmas, donde la letra griega sigma es el símbolo que usamos los científicos para referirnos a la incertidumbre total, procedente tanto de la teoría como del experimento. Esta «escala de sigmas» es el método habitual empleado en física de partículas para cuantificar cuán lejos se halla un resultado experimental de su predicción teórica. Una desviación de 4,2 sigmas quiere decir que la probabilidad de obtener dicho resultado por pura casualidad (es decir, sin que hayan intervenido nuevos fenómenos físicos) es de menos de uno entre 10.000. Sin embargo, y aunque ello suponga un fuerte indicio de haber observado nueva física, es importante señalar que tal desviación no cuenta como un descubrimiento en física de partículas, donde, para proclamar un hallazgo, es necesario alcanzar el umbral de 5 sigmas (correspondientes a una probabilidad de menos de uno entre un millón de haber obtenido dicho resultado por casualidad).

Sin embargo, ese mismo 7 de abril, un giro en los acontecimientos añadió una nueva capa de complejidad a la historia. Aquel día se publicó un nuevo cálculo teórico sobre la contribución más decisiva al magnetismo total del muon. Dicho resultado, obtenido por una colaboración internacional conocida como Budapest-Marsella-Wuppertal (BMW), se basaba en un enfoque teórico completamente distinto. En lugar de tratar el espacio y el tiempo como una entidad continua, dicho método, conocido como «cromodinámica cuántica en el retículo», modeliza el es-

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/ALEKSANDARNAKOVSKI/ISTOCK



EL EXPERIMENTO Muon g – 2, en el Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi, consta de un anillo magnético superconductor de 15 metros de diámetro. A medida que los muones lo recorren, el campo magnético induce un movimiento de precesión en el espín de las partículas.

REIDAR HAHN/LABORATORIO NACIONAL DE ACELERADORES FERMI

paciotiempo como una red de puntos. Este enfoque proporciona una solución a las complejas ecuaciones que rigen la dinámica de quarks y gluones, los componentes básicos del protón y el neutrón. Y, contrariamente a lo que indicaba el cálculo de 2020, el resultado de la colaboración BMW sugería un acuerdo entre la teoría y el experimento.

La historia del estudio del magnetismo del muon proporciona un excelente ejemplo de cómo la interacción entre teoría y experimento ha ayudado a validar nuestra imagen del universo. Ahora, los físicos nos enfrentamos a un nuevo rompecabezas: bien el de la discrepancia entre los diferentes cálculos teóricos, el de la desviación entre la teoría y el experimento, o ambos.

UNA VENTANA ÚNICA A UN MUNDO VIRTUAL

Para entender los nuevos resultados relativos al muon, conviene comenzar considerando una partícula más familiar: el electrón. Un electrón posee carga eléctrica y espín, el número cuántico que caracteriza su momento angular intrínseco. Juntas, estas dos propiedades determinan la manera en que la partícula interacciona con los campos eléctricos y magnéticos. La interacción de un electrón con un campo magnético depende de una propiedad de la partícula llamada momento magnético. Si imaginamos el electrón como un pequeño imán, su momento magnético esencialmente cuantifica la intensidad del campo magnético del propio electrón.

El valor que toma el momento magnético del electrón está relacionado con su espín por medio de un único número, el llamado «factor g». En las unidades adecuadas, el momento magnético es simplemente g veces el espín del electrón. El factor g es una cantidad adimensional (un número puro, sin unidades físicas) que, como veremos enseguida, resulta ser extremadamente cercano a 2. Un punto clave es que, a diferencia de otras propiedades del electrón, como su masa o su carga eléctrica, el factor g no es un parámetro fundamental del modelo estándar. Eso significa que su valor puede derivarse a partir de primeros principios. En otras palabras: podemos usar el modelo estándar para predecir qué fuerza ejercerá sobre un electrón un campo magnético externo.

Los ladrillos del modelo estándar son campos cuánticos que interaccionan entre sí. Cada uno de esos campos se halla asociado a una partícula elemental con una determinada carga, masa y espín. Las interacciones electromagnéticas están mediadas por fotones. Por tanto, el efecto de un campo magnético sobre un electrón queda descrito por la interacción entre el campo del fotón y el del electrón.

Sin embargo, las leyes cuánticas nos dicen que, si queremos calcular dicha interacción, no podemos limitarnos a considerar electrones y fotones. En su lugar, tendremos que incorporar también los efectos de las llamadas «partículas virtuales»: estados intermedios que se crean durante dicha interacción y que se reabsorben rápidamente antes de que podamos observarlos de manera directa. Tales intercambios virtuales incluyen todas las partículas e interacciones del modelo estándar. Por ejemplo, en ellos intervienen los electrones y sus réplicas más masivas (el muon y el tauón); los bosones W y Z, encargados de transmitir la interacción débil; y también quarks y gluones.

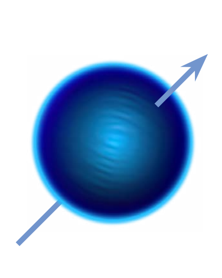
Si descartamos las contribuciones derivadas de las partículas virtuales, el cálculo del factor g del electrón arroja un valor exactamente igual a 2. Sin embargo, cuando incluimos los efectos virtuales, el número final resulta ser ligeramente mayor que 2. Esa desviación del valor $g = 2$ debida a los efectos virtuales recibe el nombre de «momento magnético anómalo» del electrón, o g – 2.

Las mismas consideraciones se aplican al muon, una partícula elemental casi idéntica al electrón solo que inestable (se desintegra espontáneamente en unos 2 microsegundos) y unas 200 veces más masiva. Al igual que su hermano más ligero, también el muon tiene un momento magnético, y también su factor g resulta ser ligeramente mayor que 2 debido a los efectos de las partículas virtuales.

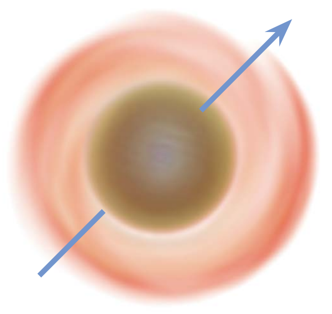
EL MOMENTO MAGNÉTICO DEL MUON

Una ventana al vacío cuántico

El muon (*azul*) es una partícula elemental casi idéntica al electrón, solo que inestable y más masiva. Puede imaginarse como un pequeño imán capaz de interaccionar con un campo magnético externo. Esa interacción depende de una propiedad de la partícula conocida como momento magnético (*flecha*). En las unidades adecuadas, este viene dado por un número adimensional usualmente denotado por *g*.



Despreciar los efectos de las partículas virtuales implica un valor $g = 2$



Incorporar los efectos de las partículas virtuales implica un valor $g > 2$

El valor de *g* puede predecirse a partir de primeros principios. Depende del modo en que el muon interacciona con las «partículas virtuales» (*naranja*) que, según las leyes cuánticas, impregnan el espacio vacío. Por tanto, una medición muy precisa de *g* puede proporcionar información sobre el vacío cuántico y, en principio, sobre la existencia de nuevas partículas elementales en la naturaleza.

Desde hace más de 70 años, el estudio del momento magnético del electrón y del muon ha proporcionado uno de los campos más fecundos para comparar las predicciones teóricas con los resultados experimentales. Ello se debe a que ambas cantidades pueden medirse experimentalmente con una precisión asombrosa, y a que sus valores teóricos pueden calcularse con el mismo nivel de precisión. Eso ha permitido hacer comparaciones entre teoría y experimento con unos niveles de precisión que carecen de parangón en cualquier otro campo de la ciencia.

En el caso de un electrón, el valor de su momento magnético puede determinarse, tanto teórica como experimentalmente, con una precisión de menos de una parte entre mil millones. En otras palabras: la incertidumbre es mil millones de veces menor que el valor en sí. Hoy por hoy, el acuerdo entre el valor experimental y la predicción teórica del momento magnético del electrón proporciona la prueba más precisa hasta la fecha de la validez del modelo estándar.

Dado que el muon es unas 200 veces más masivo que el electrón, su momento magnético resulta ser unas $200^2 = 40.000$ veces más sensible a los efectos virtuales debidos a partículas masivas. Por tanto, si en la naturaleza existen nuevas partículas e interacciones más allá de las incluidas en el modelo estándar, sus efectos podrían delatarse en el momento magnético del muon. Dichos efectos se manifestarían como una discrepancia entre el valor medido experimentalmente y la predicción teórica del modelo estándar. En principio, el momento magnético del tauón, otra «versión pesada» del electrón pero 3.500 veces más masiva, proporcionaría una sensibilidad aún mayor a nuevos fenómenos físicos. Sin embargo, su extremadamente corto tiempo de desintegración (menos de una trillonésima de segundo) impide por ahora medir con precisión su momento magnético.

Así pues, el momento magnético del muon constituye un ejemplo único de una cantidad que puede determinarse con una enorme precisión tanto experimental como teóricamente, y la cual esperamos que sea sensible a fenómenos físicos más allá del modelo estándar. Ello nos ofrece una manera indirecta pero muy prometedora de obtener pistas sobre la existencia de nuevas partículas, la cual resulta complementaria a la usada en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde lo que se persigue es crear directamente esas nuevas partículas en colisiones de muy alta energía.

LA HISTORIA DE UNA ANOMALÍA

Además de constituir un fascinante objeto de investigación por derecho propio, el estudio del momento magnético del electrón —y, posteriormente, el del muon— desempeñó un papel esencial a la hora de perfilar nuestra comprensión actual de la física de partículas.

La historia se remonta a 1924, cuando Wolfgang Pauli, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, construyó un formalismo de la electrodinámica cuántica que incorporaba el espín del electrón. Cuatro años más tarde, Paul Dirac amplió dicha formulación y derivó la ecuación que hoy lleva su nombre, la cual unificaba la descripción cuántica del electrón con los principios de la relatividad especial. Dirac se percató de que «una ventaja totalmente inesperada» de su ecuación era que permitía predecir el momento magnético del electrón. El valor calculado a partir de la ecuación de Dirac correspondía a un factor *g* igual a 2.

Otra consecuencia notable de la ecuación de Dirac fue que predecía la existencia de antipartículas, como el positrón, la antipartícula del electrón. En los años treinta, eso condujo a una formulación más general en la que las partículas y las antipartículas se convirtieron en los cuantos asociados a los distintos campos. En este formalismo, las interacciones debían incorporar el intercambio de partículas virtuales. Sin embargo, pronto apareció un problema: las contribuciones de las partículas virtuales eran a menudo aparentemente infinitas, lo que daba lugar a predicciones carentes de sentido. La solución de este problema tardaría unos años en llegar y exigiría una comprensión más profunda sobre cómo relacionar los parámetros fundamentales de la teoría con los resultados experimentales.

Justo después de la Segunda Guerra Mundial, un grupo de jóvenes físicos liderados por Isidor Isaac Rabi, de la Universidad de Columbia, comenzó a hacer medidas de precisión de los niveles energéticos del átomo de hidrógeno. En 1947, Willis Lamb anunció un impactante hallazgo: dos niveles energéticos que debían ser idénticos según la teoría de Dirac eran en realidad diferentes. El descubrimiento de este «desplazamiento de Lamb» tuvo inmediatamente una enorme repercusión. Un año más tarde, Polykarp Kusch y Henry M. Foley, también de Columbia, midieron el momento magnético del electrón usando los mismos métodos de resonancia magnética que hoy se emplean de manera rutinaria en las imágenes médicas. Su trabajo halló un valor que difería con respecto a la predicción de Dirac en más de 20 sigmas, muy por encima del umbral de 5 sigmas exigido hoy para proclamar un descubrimiento.

En el verano de 1947, dos jóvenes físicos teóricos, Julian Schwinger y Richard Feynman, abordaron el problema. Schwinger observó que, en realidad, el desplazamiento de Lamb y el momento magnético anómalo del electrón estaban conectados entre sí. Ello cambió por completo la percepción de la electrodinámica cuántica. En abril de 1948, Schwinger y Feynman habían desarrollado sendos esquemas de cálculo que, a primera vista, parecían totalmente distintos. Sin embargo, ambos podían reproducir los resultados experimentales, lo que les convenció de que, tal y como lo describiría Feynman, habían «escalado la misma montaña desde lados diferentes». El método de Feynman aportó también una manera de visualizar las interacciones entre partículas mediante sus hoy célebres diagramas, los cuales tenían la ventaja añadida de que permitían realizar los cálculos de manera muy eficiente. Pronto se supo que, en Japón, durante la guerra, Shin'ichiro Tomonaga había desarrollado su propia formulación de la electrodinámica cuántica. En 1949, en un extraordinario esfuerzo de síntesis, Freeman Dyson, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, estableció la equivalencia de los tres formalismos y demostró, además, que las predicciones de la teoría estaban libres de las cantidades infinitas que tanta preocupación habían causado unos años atrás.

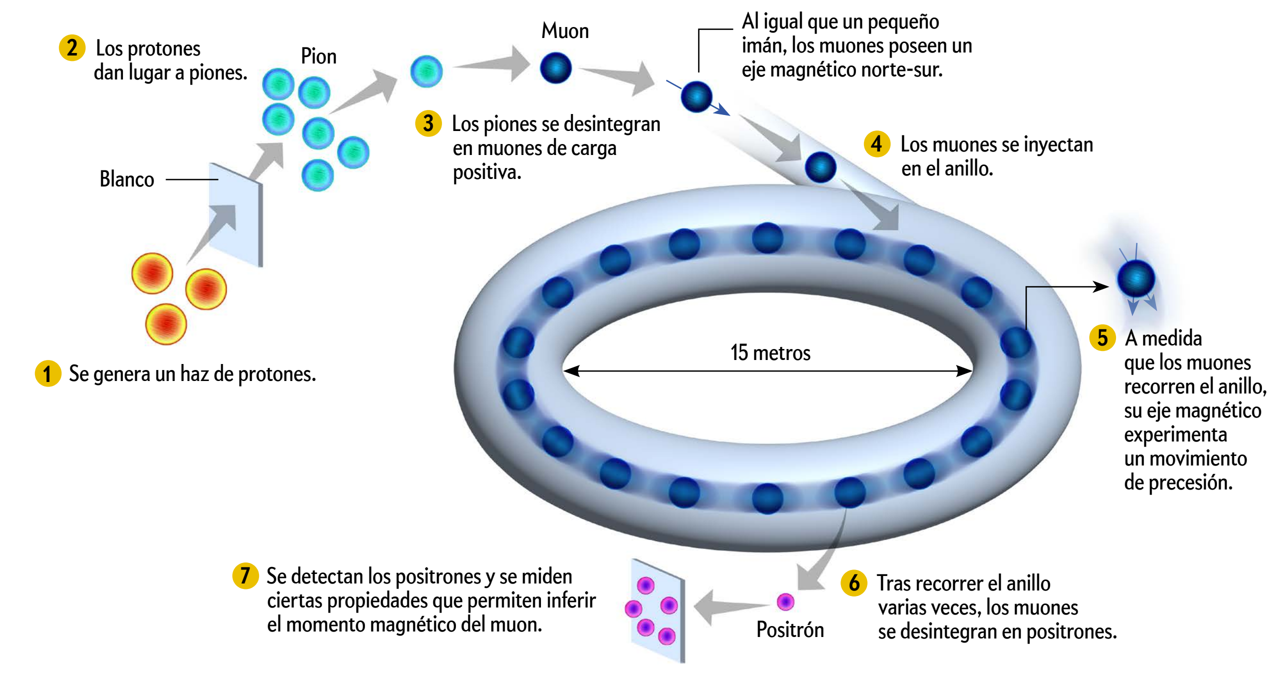
En principio, los cálculos en física de partículas exigen integrar todos los valores que pueda tomar cada campo cuántico en todos los puntos del espaciotiempo. Dado que el espaciotiempo está compuesto por un número infinito e incontable de puntos, lo anterior implicaría calcular infinitas integrales. Ello impide abordar el cálculo de manera directa. Sin embargo, había una manera de eludir dicho obstáculo.

La intensidad de la interacción entre un fotón y un electrón puede cuantificarse mediante un número adimensional llamado «constante de estructura fina», α. Este parámetro fundamental de la naturaleza resulta ser mucho menor que 1; en concreto, su valor es aproximadamente igual a 1/137. Gracias a un malabarismo matemático, cualquier cantidad que queramos calcular en física de partículas puede reescribirse como una serie de potencias de α: una suma en la que el primer término relevante es proporcional a $\alpha \approx 1/137 \approx 0{,}007$, el segundo es proporcional a $\alpha^2 \approx 1/137^2 \approx 0{,}00005$, el tercero a α^3, y así sucesivamente. Dado que α es mucho menor que 1, cada término será mucho menor que el anterior. Eso significa que cada nuevo sumando añade solo una pequeña corrección a los anteriores, y que, en principio, la suma total puede aproximarse con la precisión que deseemos calculando únicamente una cantidad finita de términos.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una nueva medición

El pasado mes de abril, el experimento Muon *g* – 2 anunció la medición más precisa hasta la fecha del momento magnético del muon. En esta instalación se genera un haz de muones con carga positiva (antimuones) que se inyectan en un anillo de 15 metros de diámetro. A medida que las partículas lo recorren, un intenso campo magnético modifica la orientación de sus espines. Cuando los muones se desintegran, el análisis de sus productos de desintegración permite determinar su momento magnético.



Un resultado intrigante

El resultado anunciado el pasado abril mostró una fuerte desviación con respecto a la predicción teórica de consenso. En caso de confirmarse, ello demostraría la existencia de física más allá del modelo estándar. Sin embargo, otros cálculos teóricos implican valores que parecen coincidir con el resultado experimental.

Por otro lado, cada uno de los términos de la serie puede interpretarse físicamente como un intercambio de partículas virtuales; un proceso que puede visualizarse con ayuda de los diagramas de Feynman. Al calcular el momento magnético del electrón, la contribución principal procede de la interacción directa del electrón con un campo magnético; es decir, sin el intercambio de ninguna partícula virtual. Esto proporciona el valor $g = 2$ predicho por la teoría de Dirac. La primera corrección, proporcional a α, corresponde al intercambio de un fotón virtual. En el diagrama de Feynman asociado, este fotón introduce un «bucle» (un circuito cerrado) de partículas virtuales, lo que equivale a la corrección al factor g calculada por Schwinger en 1948. El siguiente término, proporcional a α^2, implica la aparición de dos bucles de partículas virtuales. Fue calculado un año más tarde y, una vez más, resultó coincidir con el resultado experimental dentro del margen de precisión correspondiente.

EL RETO TEÓRICO

Sin embargo, la dificultad del cálculo aumenta de manera notable a medida que consideramos más y más términos en la serie de potencias. Ello se debe a que cada nuevo término implica la aparición de más bucles de partículas virtuales, y tanto la cantidad como la complejidad de los diagramas de Feynman asociados crecen muy rápido con el número de bucles. Además, en el marco del modelo estándar, el cálculo completo debe incluir las contribuciones virtuales de todas las interacciones: no solo las electromagnéticas, sino también las asociadas a las fuerzas nucleares débil y fuerte.

Por ahora, no está claro por qué dos cálculos que en principio tendrían que haber dado el mismo resultado han acabado arrojando valores distintos

Para lograr la precisión de las últimas medidas experimentales, fueron necesarias varias décadas de cálculos a fin de incluir los 12.672 diagramas con cinco bucles que contribuyen al momento magnético del electrón y del muon solamente por medio de la interacción electromagnética. La principal contribución debida a la interacción débil fue calculada en 1972.

La fuerza nuclear fuerte desempeña un papel clave en el cálculo del momento magnético del muon. Sin embargo, evaluarla requiere proceder de una manera totalmente distinta. Ello se debe a que, en el régimen de energías que nos ocupa, el equivalente a la constante de estructura fina (el parámetro que caracteriza la intensidad de la interacción) no es un número pequeño. Por tanto, al calcular la serie de potencias, cada término será mayor que el anterior, lo que invalida por completo este método. Dicho de otro modo: los efectos de la interacción fuerte ya no pueden aproximarse de manera fidedigna mediante un número finito de bucles de partículas virtuales. Este problema afecta a numerosos cálculos en cromodinámica cuántica, la teoría que describe las interacciones fuertes.

En los diagramas de Feynman asociados, las contribuciones de la interacción fuerte se representan en su lugar mediante «manchas virtuales»: nubes indefinidas de estados virtuales que contienen un número arbitrario de partículas. En el cálculo del momento magnético del muon intervienen varias contribuciones de este tipo. La más crítica de ellas recibe el nombre de «polarización del vacío», e incluye una de estas manchas en medio del intercambio de un fotón virtual.

Dado que las ecuaciones de la cromodinámica cuántica no pueden resolverse de la manera habitual, ¿cómo podemos calcular estas contribuciones? Una solución consiste en emplear propiedades teóricas básicas para relacionar los términos que no podemos calcular con cantidades medibles. Por ejemplo, la contribución de la polarización del vacío puede relacionarse con los resultados de experimentos en los que un electrón y un positrón se aniquilan y dan lugar a estados ligados de quarks. Este enfoque se conoce como «guiado por datos» y permite alcanzar una precisión notable, del orden de seis por mil. Sin embargo, en comparación con las demás contribuciones, la polarización del vacío sigue suponiendo la mayor fuente de incertidumbre en el cálculo del momento magnético del muon. Como consecuencia, buena parte del trabajo teórico actual está centrado en reducir el error asociado a este término.

No obstante, existe una manera alternativa de calcular los efectos de la interacción fuerte. Esta técnica, conocida como «cromodinámica cuántica en el retículo», se remonta a los años setenta y parte de un enfoque totalmente distinto al basado en diagramas de Feynman. En ella, el espacio y el tiempo quedan modelizados por una red discreta de puntos. Y dado que el espaciotiempo ya no se trata como un ente continuo, los infinitos cálculos que en principio tendríamos que hacer quedan reducidos a una cantidad finita de ecuaciones que podemos resolver con ayuda de los mejores superordenadores. En los últimos años, un gran esfuerzo colectivo ha dado lugar a múltiples avances computacionales que buscan alcanzar una precisión similar a la del enfoque guiado por datos. El resultado de la colaboración BMW publicado el 7 de abril (y que ya se había dado a conocer más de un año antes en el repositorio de prepublicaciones arXiv) constituye un primer ejemplo de un cálculo con este formalismo con una incertidumbre inferior al uno por ciento.

LA PRUEBA EXPERIMENTAL

En el frente experimental, las mediciones actuales del momento magnético del muon son herederas de una larga historia que comenzó en el CERN en los años sesenta, continuó en Brookhaven y llegó a su encarnación actual en el Fermilab. En 2013, la piedra angular del experimento de Brookhaven, un anillo magnético superconductor de 700 toneladas y 15 metros de diámetro, fue meticulosamente transportada en una sola pieza con barcazas y camiones a lo largo de 5000 kilómetros hasta el Fermilab. Allí, un haz de muones con carga positiva (es decir, antimuones) se inyecta en el anillo. A medida que estos orbitan, el campo magnético hace que el espín de las partículas experimente un movimiento de precesión. Por último, los muones se desintegran y se convierten en positrones, los cuales impactan contra los detectores situados en las paredes del anillo. Las propiedades de dichos positrones permiten deducir la frecuencia de precesión de los muones y, a partir de ella, su momento magnético.

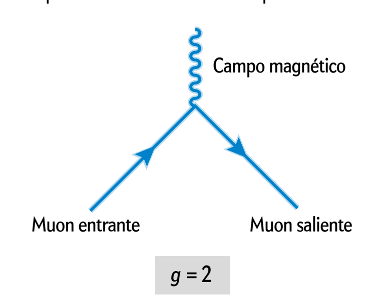
Dos de las principales diferencias entre los experimentos del Fermilab y de Brookhaven son la mayor intensidad del haz de muones y la mejor calibración del campo magnético del anillo. Además, para evitar cualquier sesgo causado por un conocimiento previo del resultado o de otros trabajos en curso, en

PREDICCIÓN TEÓRICA 1

Calcular el efecto de las partículas virtuales

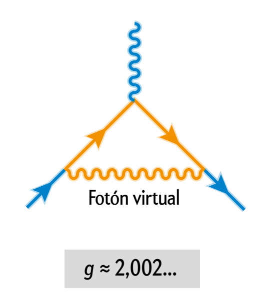
Para predecir el valor del momento magnético del muon, *g*, es necesario calcular el modo en que las partículas virtuales modifican la interacción entre un muon y un campo magnético. La manera habitual de hacerlo es mediante diagramas de Feynman. En estos, el tiempo corre de izquierda a derecha y las diferentes líneas representan partículas de distintos tipos.

Cada diagrama está asociado a un cálculo complejo. Añadir más partículas virtuales (*naranja*) implica aumentar la precisión del resultado final. Para alcanzar una precisión equiparable a la de las últimas mediciones experimentales han sido necesarias décadas de trabajo teórico a fin de calcular las decenas de miles de diagramas que contribuyen al resultado final.



$g = 2$

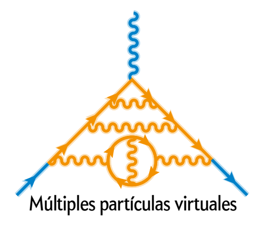
Caso más simple: Un muon (*línea sólida*) interacciona con un campo magnético (*línea ondulada*) y sigue su curso. No se intercambian partículas virtuales. El resultado es $g = 2$.



$g \approx 2{,}002...$

Primera corrección: El muon emite un fotón virtual que después es reabsorbido por el propio muon. Este intercambio introduce un bucle de partículas virtuales (*naranja*) e implica un valor de *g* ligeramente mayor que 2.

...

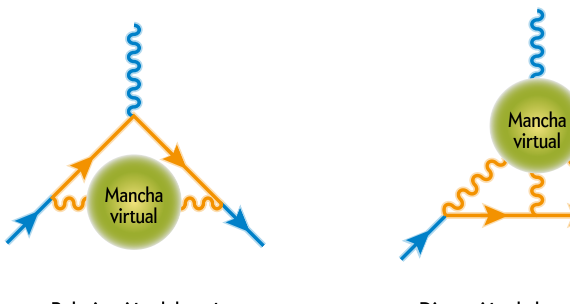


$g \approx 2{,}002331836...$

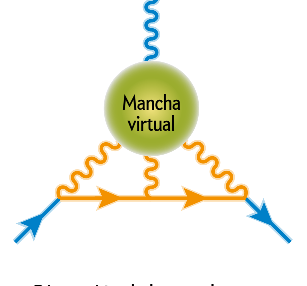
Vorágine de partículas: Los cálculos se complican a medida que consideramos más partículas virtuales. Por ejemplo, diagramas con cinco bucles y relacionados únicamente con la interacción electromagnética hay 12.672. Este esquema ilustra uno de ellos.

El problema de las interacciones fuertes

El cálculo completo exige incluir los efectos virtuales de todas las partículas e interacciones conocidas. Sin embargo, a bajas energías, los efectos de la interacción fuerte (la que gobierna la dinámica de quarks y gluones) no pueden calcularse mediante diagramas de Feynman. Ello se debe a que, como indica su nombre, la intensidad de esta interacción es muy elevada. Esta propiedad implica que añadir más partículas virtuales no equivale a añadir más precisión al resultado final, lo que invalida este método de cálculo.



«Polarización del vacío»



«Dispersión de luz por luz»

En su lugar, los efectos debidos a quarks y gluones quedan representados por «manchas virtuales» (*verde*) que contienen un número arbitrario de partículas. Aunque estas contribuciones no pueden calcularse directamente, pueden evaluarse relacionándolas con los resultados de otros experimentos. Este método se conoce como «guiado por datos». Aquí se muestran las dos contribuciones de la interacción fuerte que más afectan a la precisión del cálculo del momento magnético del muon: la polarización del vacío y la dispersión de luz por luz.

el Fermilab se llevó a cabo un «análisis ciego»: a los investigadores se les ocultó el valor de uno de los parámetros necesarios para extraer la medida final del momento magnético del muon. Dicho parámetro solo era conocido por dos físicos ajenos a la colaboración, y únicamente se hizo público una vez concluido el análisis de datos.

El resultado, anunciado el 7 de abril en *Physical Review Letters*, confirmó el obtenido veinte años atrás en Brookhaven con un nivel de precisión similar. La combinación de ambas mediciones proporciona el que, en estos momentos, es el valor experimental del momento magnético anómalo del muon, el cual goza de una precisión de unas 0,5 partes por millón.

Junto con más de un centenar de físicos, dos de los autores de este artículo (Herdoíza y Marinković) participamos en el cálculo del valor teórico publicado en 2020. Como ha expresado nuestra compañera Aida El-Khadra, física teórica de la Universidad de Illinois que codirigió esta colaboración mundial sin precedentes, «es la primera vez que la comunidad teórica ha llevado a cabo un esfuerzo colaborativo de este tipo». El resultado se basó en el enfoque guiado por datos debido al alto nivel de precisión logrado con esta técnica por varios grupos independientes, así como a la coherencia interna entre los distintos resultados. El valor final implica una desviación de 4,2 sigmas con respecto al resultado experimental.

Por su parte, el cálculo de la colaboración BMW, obtenido gracias al método de la cromodinámica cuántica en el retículo, arrojó un valor teórico mucho más cercano al experimental, lo que sugiere que no habría diferencias significativas entre uno y otro. En principio, el calculo de la colaboración BMW tendría que arrojar el mismo valor que el enfoque guiado por datos. Por ahora no está claro por qué eso no ocurre, al menos hasta que dicho cálculo se coteje con otros cómputos en el retículo de

precisión similar. La resolución de este enigma ocupará un papel central en las investigaciones teóricas de los próximos años.

EXPECTATIVAS SOBRE EL FUTURO

Tras estos acontecimientos, buena parte del trabajo futuro estará dirigido a consolidar la predicción del modelo estándar. Nuevos datos experimentales permitirán afinar la contribución de las interacciones fuertes usando el método guiado por datos. Al mismo tiempo, varios grupos en todo el mundo tendrán como prioridad mejorar la precisión de los cálculos en el retículo. Y distintas pruebas en curso seguirán controlando la coherencia mutua de ambos métodos. Desde el lado experimental, el Fermilab ya ha acumulado una estadística varias veces mayor que la de Brookhaven. El objetivo para los próximos dos años será multiplicarla por 20 y reducir la incertidumbre total a la cuarta parte.

Por su parte, el CERN está planeando un nuevo experimento llamado MUonE. Gracias a un intenso haz de muones, este intentará medir de manera directa la problemática contribución de la polarización del vacío mediante la dispersión de muones y electrones. Según Graziano Venanzoni, físico del Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) italiano en Pisa que trabaja tanto en MUonE como en el experimento del Fermilab, «MUonE podría resolver las potenciales discrepancias entre los resultados del retículo y los del enfoque guiado por datos».

Además, el Complejo de Investigación del Acelerador de Protones de Japón (J-PARC) está planificando otro experimento para medir el momento magnético anómalo del muon mediante una técnica completamente distinta. Al emplear muones diez veces más lentos que los usados en el Fermilab, su trayectoria circular podrá acomodarse en un anillo de 66 centímetros de diámetro. Este experimento debería proporcionar una comprobación clave de los métodos usados hasta ahora.

Una vez que los resultados teóricos y experimentales estén claros y puedan considerarse estables, cabe considerar varios escenarios. A fin de explorarlos, hemos solicitado la opinión a varios colegas de profesión implicados en este problema.

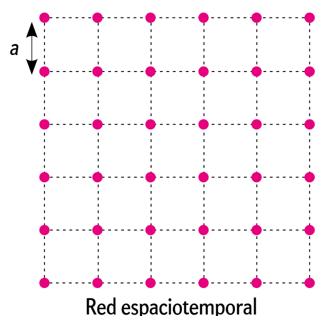
PREDICCIÓN TEÓRICA 2

Otra manera de tratar el espacio y el tiempo

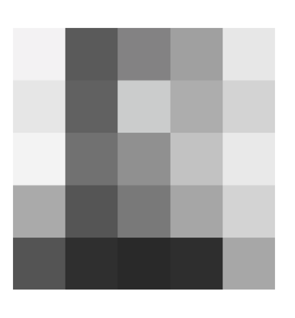
Para calcular el efecto de las interacciones fuertes, un método alternativo a los diagramas de Feynman consiste en modelizar el espacio y el tiempo como una red de puntos. Ello da lugar a un número finito de ecuaciones que pueden resolverse en un superordenador. Esta técnica, conocida como «teoría de campos en el retículo», se remonta a los años setenta, pero en los últimos años su precisión ha mejorado considerablemente.

Esté método funciona de manera análoga al almacenamiento digital de imágenes, en el que una imagen continua pasa a estar compuesta por píxeles. En lugar de un espaciotiempo continuo, tenemos una cuadrícula en la que solo podemos avanzar en «pasos» de longitud *a*.

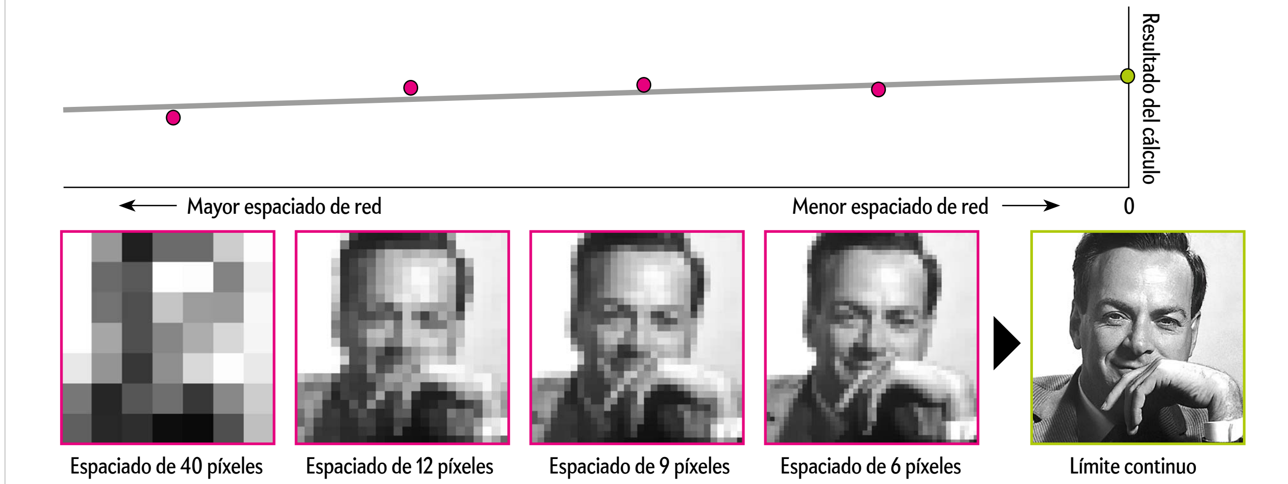




Red espaciotemporal



Por supuesto, en el mundo real el espacio y el tiempo son continuos. Esto corresponde al límite en el que el espaciado de la cuadrícula, *a*, es cero. Sin embargo, hacer *a* cada vez menor implica aumentar el número total de «píxeles» y, con ello, la complejidad del sistema que debe resolverse. Hoy en día, los superordenadores pueden efectuar los cálculos en una red espaciotemporal formada por cientos de millones de puntos y con un espaciado entre ellos inferior a la décima parte del tamaño de un protón. Para inferir el resultado en un espaciotiempo continuo, el cálculo se repite con un valor de *a* cada vez menor (*gráfica, puntos magenta*). Eso da lugar a una curva (*gris, ejemplo simplificado*) que puede extrapolarse al caso $a = 0$ (*verde*).

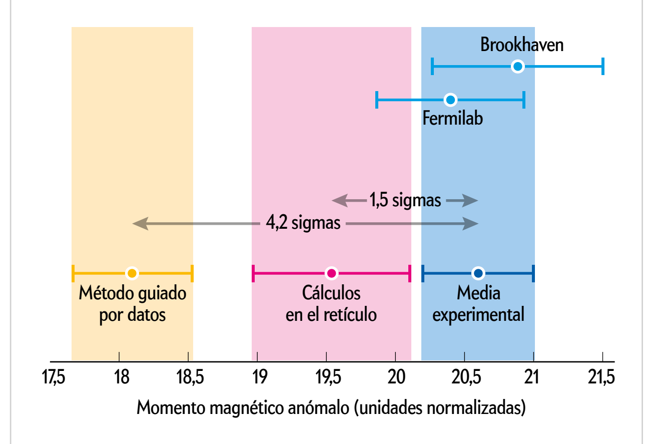


INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (gráficos); FUNDACIÓN NOBEL/DOMINIO PÚBLICO (Richard Feynman)

RESULTADOS

¿Nueva física?

Los resultados anunciados el pasado abril en el Fermilab (dos décadas después del experimento predecesor en el Laboratorio Nacional Broockhaven) implican un valor para el momento magnético del muon (*azul*) marcadamente distinto del que arroja la predicción basada en el método guiado por datos (*naranja*). Sin embargo, nuevos cálculos basados en la teoría de campos en el retículo parecen implicar un resultado (*magenta*) mucho más cercano al experimental. Por ahora, no está claro por qué dos cálculos que en principio tendrían que haber dado el mismo resultado han acabado arrojando valores distintos.



Una desviación entre la teoría y el experimento por encima de las 5 sigmas implicaría la existencia de nueva física más allá del modelo estándar. Desde hace tiempo, los físicos teóricos han considerado varias extensiones que podrían explicar la discrepancia en el momento magnético del muon. Entre ellas, la supersimetría es un marco genérico que predice que cada especie de partícula presente en el modelo estándar debería tener una «supercompañera». Entre otras ventajas, ello aporta posibles candidatos para explicar la materia oscura al tiempo que aspira a resolver el llamado «problema de la naturalidad»: por qué las partículas elementales se disponen en escalas de energía tan extremadamente alejadas unas de otras. «La supersimetría seguiría siendo un candidato, pero el hecho de que el LHC no haya obtenido indicios a su favor merma considerablemente sus perspectivas», apunta Bill Marciano, físico teórico de Brookhaven. «En mi opinión, una extensión del sector de Higgs [la existencia de más de un bosón de Higgs] sería la mejor apuesta, aunque para nada una apuesta segura.»

«Quizá deberíamos dejar de preocuparnos por la naturalidad y tal vez la materia oscura se deba a otro tipo de partícula, como un bosón muy ligero» afirma John Ellis, físico teórico del King's College de Londres. «Hoy por hoy, esta posibilidad me gusta (casi) tanto como la supersimetría.» Además, el hallazgo de nuevos fenómenos físicos en el momento magnético del muon podría orientar e impulsar otras investigaciones. «Una posibilidad cada vez más explorada es la de que existan partículas de vida larga que hayan conseguido evadir las búsquedas del LHC», continúa Ellis. Y otra vía, añade el investigador, consistiría en examinar con más detalle los indicios observados en los últimos años por el experimento LHCb acerca de una asimetría inesperada entre muones y electrones.

Por otro lado, una situación en la que la diferencia entre la teoría y el experimento se quedase entre 3 y 4 sigmas «sería muy decepcionante», opina Lee Roberts, físico experimental de la Universidad de Boston y miembro del experimento de Fermilab que también participó en el de Brookhaven. «Sin embargo, es estadísticamente posible», reconoce.

«Alcanzar una precisión experimental aún mejor que la actual exigirá superar varios obstáculos técnicos», señala Alex Keshavarzi, físico de la Universidad de Mánchester y miembro de Muon $g-2$ que también participó en el cálculo de 2020. «Uno de ellos será conseguir una mejora significativa en la medición del campo magnético más allá de las 70 partes por mil millones que se está intentando en el Fermilab. También habría que pensar en un nuevo acelerador que produjera un haz de muones de mayor intensidad y velocidad de repetición, junto con detectores de partículas de última generación.»

Por último, una situación en la que los resultados experimentales acabaran coincidiendo con la predicción del modelo estándar acabaría con una de las vías más prometedoras para descubrir nueva física. «Sería el fin de una era», afirma Massimo Passera, físico teórico del INFN en Padua. «Pero primero deberemos entender las diferencias entre las distintas determinaciones de las contribuciones de la interacción fuerte. El experimento MUonE podría resolver este enigma», añade.

Ocurra lo que ocurra, los muones no están solos en estas búsquedas. El año pasado, una mejora extraordinaria permitió obtener una nueva medición de la constante de estructura fina electromagnética con una precisión de 81 partes por billón. Eso condujo a una nueva determinación de la predicción del modelo estándar para el momento magnético del electrón. Esta ha coincidido con el resultado experimental, lo que supone otro triunfo del modelo estándar. Sin embargo, la nueva medición de la constante de estructura fina difiere de la anterior en 5,4 sigmas, una discrepancia cuyo origen explorarán varios experimentos en curso. Y en los próximos años, las mejoras en la determinación del momento magnético del electrón permitirán aguzar su sensibilidad a nuevos fenómenos físicos hasta un nivel similar a la del muon.

Sea cual sea el resultado de las próximas comparaciones entre la teoría y el experimento, la física fundamental vivirá un impulso que le permitirá continuar en su búsqueda de cualquier grieta en el edificio del modelo estándar. IyC

PARA SABER MÁS

The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model. Tatsumi Aoyama et al. en *Physics Reports*, vol. 887, págs. 1-166, 3 de diciembre de 2020.

Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD. Szabolcs Borsanyi et al. en *Nature*, vol. 593, págs. 51–55, 7 de abril de 2021.

Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm. Colaboración Muon *g* –2 en *Physical Review Letters*, vol. 126, art. 141801, 7 de abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

El confinamiento de los quarks. Yoichiro Nambu en *IyC*, enero de 1977.

Quarks por ordenador. Donald H. Weingarten en *IyC*, abril de 1996.

La física y los diagramas de Feynman. David Kaiser en *IyC*, septiembre de 2005.

Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *IyC*, junio de 2013.

El LHC sigue viendo indicios de nueva física. Daniel Garisto en *IyC*, mayo de 2021.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA. FUENTES: «MEASUREMENT OF THE POSITIVE MUON ANOMALOUS MAGNETIC MOMENT TO 0.46 PPM»; MUON G -2 COLLABORATION EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 126, 141801, ABRIL DE 2021; LUCIUS BUSHNAQ; GREGORIO HERDOÍZA; MARINA KRSTIĆ MARINKOVIĆ; LAURENT LELLOUCH

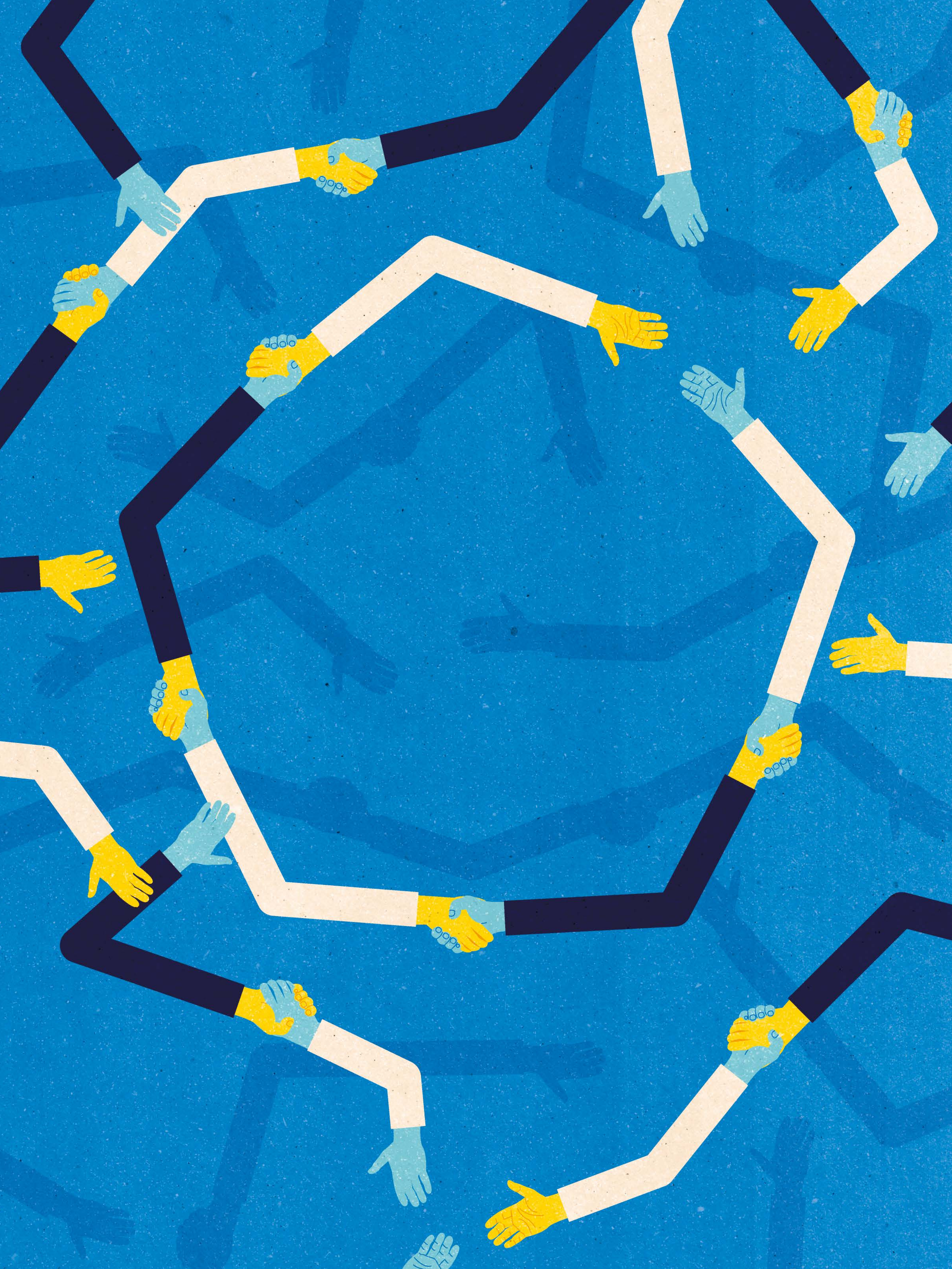


Las leyes matemáticas de la conectividad

La teoría de la percolación está iluminando el comportamiento de sistemas muy diversos, desde las conexiones entre teléfonos móviles hasta las redes de contagio de una enfermedad

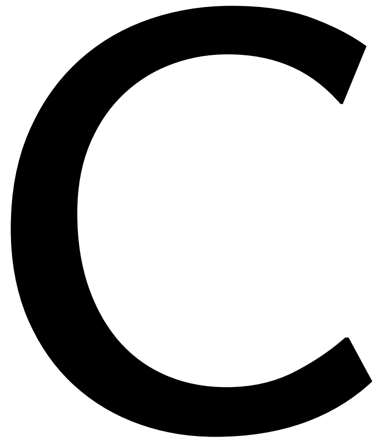
Kelsey Houston-Edwards

Ilustración de Kotryna Zukauskaite



Kelsey Houston-Edwards es matemática y periodista científica. Ha escrito y presentado la serie *Infinite series*, de la cadena estadounidense PBS.

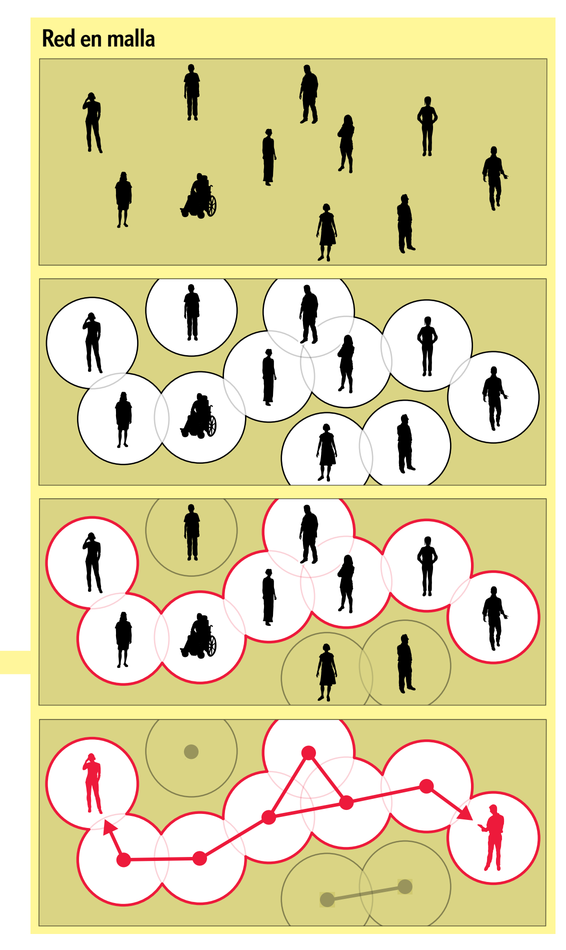




CUANDO PULSAMOS «ENVIAR» tras escribir un mensaje de texto, es fácil imaginar que la nota viajará directamente desde nuestro teléfono hasta el del destinatario. Pero, en realidad, suele efectuar un largo periplo a través de una red de telefonía móvil o de Internet, las cuales dependen de una infraestructura centralizada que puede sufrir daños por desastres naturales o ser bloqueada por un Gobierno represivo. Por miedo a la vigilancia o la interferencia del Estado, los participantes en las protestas de Hong Kong de 2019 y 2020 que tenían conocimientos técnicos evitaron Internet y emplearon programas como FireChat y Bridgefy para enviar mensajes de forma directa entre teléfonos próximos.

Esas aplicaciones permiten que una misiva salte de un móvil a otro hasta poner en contacto al emisor con el receptor, que son los únicos capaces de ver el mensaje. Los conjuntos de teléfonos vinculados, conocidos como «redes en malla» o «redes móviles *ad hoc*», posibilitan una comunicación flexible y descentralizada. Pero, para que dos terminales cualesquiera se comuniquen, deben estar conectadas por una cadena de teléfonos. ¿Cuántas personas repartidas a lo largo de Hong Kong han de estar vinculadas por la misma red en malla para posibilitar la comunicación a través de la ciudad?

Una rama de las matemáticas denominada teoría de la percolación ofrece una respuesta sorprendente: unas pocas personas pueden cambiarlo todo. A medida que los usuarios se unen a la red, van sur-



WEE PEOPLE FONT, PROPUBLICA Y ALBERTO CAIRO (*siluetas*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustraciones*)

EN SÍNTESIS

Numerosos sistemas en telecomunicaciones, epidemiología y otros campos comparten una propiedad: pueden modelizarse matemáticamente mediante una red, un sistema muy sencillo consistente en un conjunto de nodos unidos entre sí.

Una propiedad clave de toda red atañe a su grado de conectividad. La teoría de la percolación, un campo cuyos orígenes se remontan a mediados del siglo pasado, estudia en qué momento la conectividad de una red pasa de ser local a global.

Gracias a varios avances teóricos y a las simulaciones por ordenador, en los últimos años este formalismo ha permitido analizar todo tipo de transiciones, desde el comienzo de una pandemia hasta la viralización de un meme en redes sociales.

giendo focos aislados de teléfonos conectados. Pero la comunicación completa de este a oeste o de norte a sur aparece de repente, cuando la densidad de usuarios supera cierto umbral. Los científicos describen este rápido cambio en la conectividad de una red mediante una transición de fase: el mismo concepto usado en física para tratar los cambios bruscos en el estado de agregación de un material, como la fusión del hielo o la ebullición del agua.

La teoría de la percolación examina las consecuencias de crear o eliminar enlaces de manera aleatoria en este tipo de redes. Para los matemáticos, tales redes quedan definidas por un conjunto de nodos (puntos) unidos entre sí por una serie de enlaces, o aristas (líneas). Cada nodo simboliza un objeto, como un teléfono o una persona, y las aristas representan una relación entre dos de ellos. La idea fundamental de la teoría de la percolación, que se remonta a los años cincuenta del siglo pasado, es que, al aumentar el número de enlaces de una red, surge de repente una agrupación global de nodos conectados.

La pregunta que tratan de responder los científicos es: ¿cuándo ocurre eso? Dada una red concreta, ¿cuál es el equivalente de los 0 grados Celsius a los que se derrite el hielo o los 100 grados Celsius a los que hierve el agua? ¿En qué momento se hace viral un meme, pasa un producto a dominar un mercado o se desencadena un terremoto? ¿Cuándo alcanza una red de teléfonos móviles la conectividad plena? ¿Cuándo se convierte una enfermedad en pandemia? La teoría de la percolación permite comprender mejor todas esas transiciones.

Los matemáticos suelen estudiar redes idealizadas, con una geometría simétrica y una extensión infinita, ya que son estas las que se prestan a los cálculos teóricos. En general, las redes infinitas son las únicas que exhiben transiciones de fase realmente abruptas. Las redes de la vida real presentan un tamaño finito, suelen ser desordenadas y exigen cálculos complejos. Pero también presentan transiciones, aunque más suaves. A medida que el mundo deviene cada vez más interconectado por complejas capas de enlaces que transportan personas, que les proporcionan energía mediante redes eléctricas, que las ponen en contacto a través de redes sociales o de redes de contagio que propagan enfermedades, la teoría de la percolación está cobrando una importancia cada vez mayor para entender nuestras sociedades.

CAMBIOS REPENTINOS

En 1957, los matemáticos británicos Simon Ralph Broadbent, de la Unión de Fabricantes de Botellas del Reino Unido, y John Michael Hammersley, de la Institución para la Investigación en Energía Atómica, plantearon por primera vez la teoría de la percolación como un problema puramente matemático. La abstrajeron del estudio de la percolación en química, donde describe cómo se filtra un fluido a través de un material, como el petróleo a través de una roca porosa o el agua a través del café molido. La red de percolación de una capa de roca está formada por los pequeños orificios de su estructura (los nodos) junto con las grietas que permiten que el fluido circule entre ellos (las aristas). Como es lógico, el petróleo fluye mejor a través de las rocas más fracturadas. A partir de su teoría de la percolación, Broadbent y Hammersley predijeron que, en una roca idealizada, el petróleo pasaría de fluir solo en pequeñas regiones a impregnar de repente casi toda la roca cuando la densidad de grietas superase un cierto valor umbral.

Los geólogos emplean una versión de la teoría de la percolación para estudiar el tamaño de las agrupaciones de nodos en las rocas fracturadas, un factor relevante para la extracción de petróleo mediante fracturación hidráulica o para el estudio de terremotos. Para modelizar estos últimos, los sismólogos crean redes de percolación que reproducen la escala y la densidad de las grietas observadas, e incluyen las tensiones ajustando la probabilidad de que esas fisuras se unan. Las agrupaciones van extendiéndose a medida que aumentan las tensiones y las conexiones hasta que, de manera súbita e imprevisible, se produce un terremoto. Algunas versiones modificadas del proceso permiten que las grietas se cierren y vuelvan a abrirse para simular réplicas sísmicas o cambios a largo plazo.

La teoría de la percolación también arroja luz sobre fenómenos físicos y químicos que ocurren a escalas mucho menores, como la polimerización, el proceso por el que pequeñas moléculas simples, denominadas monómeros, se unen para formar agrupaciones mayores. En el marco de la teoría de la percolación, cada monómero actúa como un nodo, y dos monómeros vecinos pueden formar espontáneamente un enlace químico,

Transición de fase

6 nodos
Nodo
Arista
7 nodos
8 nodos
9 nodos
10 nodos
11 nodos

lo que equivale a una arista. Si la probabilidad de que dos de ellos se unan aumenta, el sistema acabará alcanzando el umbral de percolación y surgirá un enorme polímero conectado. Este proceso es el que, por ejemplo, hace que cuaje la gelatina en polvo disuelta en agua.

Las redes de rocas fracturadas o las que forman los polímeros son muy intrincadas, por lo que resulta casi imposible describir de forma precisa su estructura. Sin embargo, Broadbent y Hammersley demostraron que esta puede aproximarse mediante patrones repetitivos que sí se prestan al análisis. El ejemplo más sencillo lo hallamos en una red cuadrada, similar una hoja infinita de papel cuadriculado, en la que cada nodo queda conectado por cuatro aristas a sus vecinos.

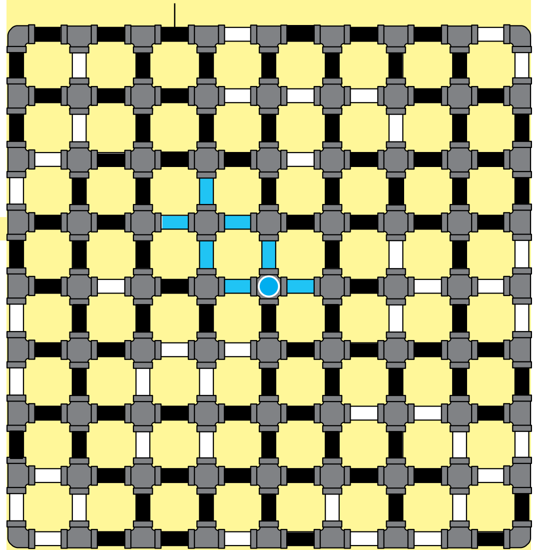
Para entender cómo se desplazaría un fluido a través de una red cuadrada, imaginemos que cada arista es una tubería que puede encontrarse abierta o cerrada. Podemos determinar el estado de cada una lanzando al aire una moneda. La disposición de tuberías abiertas y cerradas así obtenida constituye una red aleatoria, la cual contendrá algunas agrupaciones abiertas: conjuntos de nodos en los que todos ellos estarán conectados mediante tuberías abiertas. Si vertemos agua en un nodo cualquiera de una de esas agrupaciones, el líquido fluirá a través de las tuberías hasta llegar a todos los nodos de la agrupación.

La teoría de la percolación se ocupa de la conectividad de la red, que dependerá de cuán grandes sean las agrupaciones abiertas. Pero «grande» es un concepto ambiguo que no se presta demasiado bien al formalismo matemático, por lo que los investigadores suelen remplazar los números grandes por el infinito. Así pues, la pregunta clave pasa a ser si existe o no una agrupación infinita. «Responder a tales preguntas de tipo "sí o no" resulta mucho más fácil que especificar cuántas agrupaciones vemos de cada tamaño», señala Benedikt Jahnel, matemático del Instituto Weierstrass de Análisis Aplicado y Estocástica de Berlín.

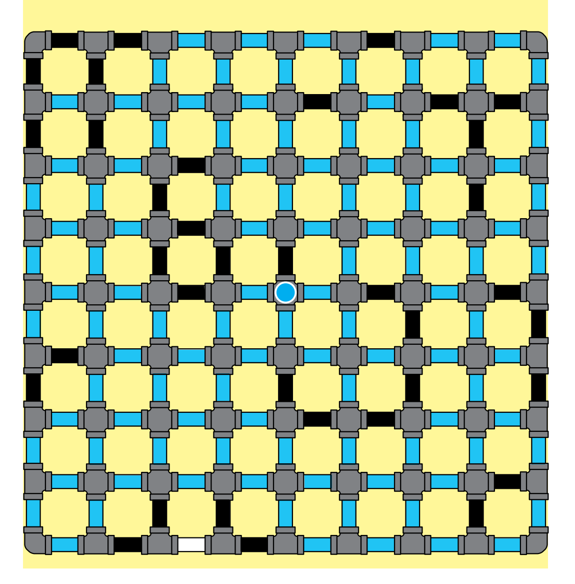
De hecho, la probabilidad de que una red infinita posea una agrupación infinita es siempre 0 o 1. Ello se debe a que el proceso de percolación se encuentra sujeto a un principio general llamado «ley cero-uno», descubierto por el matemático soviético Andréi Kolmogórov en los años treinta del siglo pasado. Imaginemos que lanzamos una moneda al aire

Red cuadrada

Si fijamos una probabilidad de 1/3, cada arista (tubería) tendrá 1 posibilidad entre 3 de estar abierta (*blanco*). En este ejemplo de una red de 9 × 9 nodos, cuando vertemos agua (*azul*) en el nodo central, el líquido se estanca tras alcanzar otros 6 nodos.



En cambio, si la probabilidad de que cada tubería esté abierta se fija en 3/4, el agua vertida en el nodo central acabará llegando hasta los bordes del retículo.



infinitas veces. La ley cero-uno atañe a toda pregunta sobre los resultados cuya respuesta no dependa de un número finito de lanzamientos. Por ejemplo, la respuesta a la cuestión «¿ha salido cara infinitas veces?» no varía si modificamos un número finito de lanzamientos de moneda. En cambio, la respuesta a «¿ha salido cara la tercera vez?» puede cambiarse alterando un solo lanzamiento.

La ley cero-uno establece que los cambios de tamaño finito no pueden perturbar los fenómenos que son infinitos por naturaleza. De modo que la probabilidad de encontrar una agrupación infinita en una red infinita no puede alterarse un poco (por ejemplo, de 0,81 a 0,82), sino que debe adoptar uno de los valores extremos: 0 o 1. Dicho de otro modo, una red infinita, o bien no tiene ninguna agrupación infinita (la probabilidad de encontrar una agrupación infinita es 0), o sí la tiene (la probabilidad es 1).

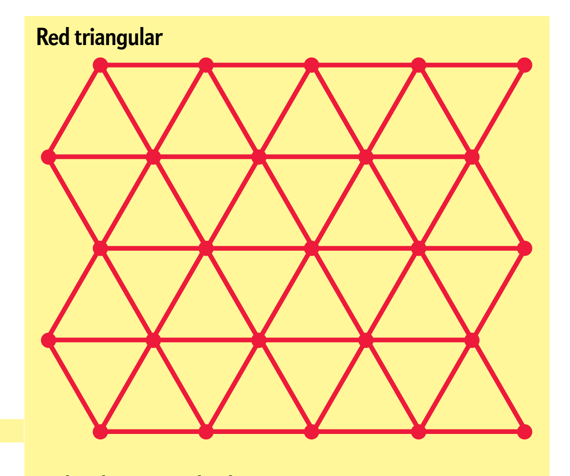
Como consecuencia, cambiar un número finito de tuberías abiertas por cerradas, o viceversa, no afecta a la posible existencia de una agrupación abierta infinita. La probabilidad de hallar una de tales agrupaciones es 0 o 1. Pero ¿cuál de las dos?

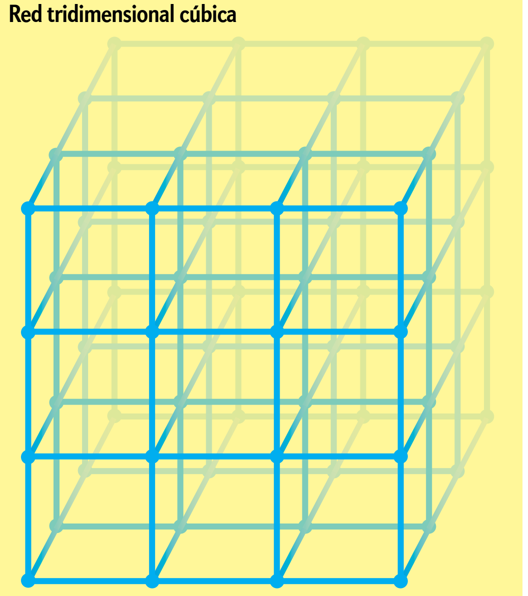
ENCONTRAR EL UMBRAL

La respuesta depende de la propensión de nuestra moneda a caer cara o cruz. Supongamos que disponemos de un dial que controla esa tendencia. Si lo giramos completamente hacia la izquierda, la moneda siempre caerá cruz, lo que supondremos que equivale a cerrar nuestra tubería. Una vez que todas las tuberías estén cerradas, el agua vertida en un nodo cualquiera no fluirá a ninguna parte, por lo que la probabilidad de encontrar una agrupación infinita será 0. A medida que giremos el dial, aumentará la probabilidad de que la moneda caiga cara, por lo que cada vez habrá más tuberías abiertas. Cuando el dial llegue al otro extremo, la moneda siempre caerá cara, todas las tuberías estarán abiertas y el agua vertida en cualquier nodo acabará llegando a todos los demás. En esta situación, la probabilidad de encontrar una agrupación infinita es 1.

Si giramos poco a poco el dial, la probabilidad de que las tuberías estén abiertas aumentará de forma gradual, lo que podría hacernos pensar que la probabilidad de encontrar una agrupación infinita también debería pasar paulatina-

mente de 0 a 1. Pero, en realidad, el cambio se produce de manera instantánea debido a la ley cero-uno, la cual dicta que nuestra probabilidad no puede tomar un valor intermedio entre 0 y 1. En el caso de una red cuadrada, la probabilidad salta de 0 a 1 cuando el dial se encuentra exactamente en el centro; es decir, si efectuamos nuestros lanzamientos con una moneda justa. Esta posición crítica del dial se conoce como umbral de percolación. Sea cual sea la forma de la red (ya se trate de una red triangular o de una versión tridimensional de la red cuadrada, por ejemplo), la pregunta clave a la que se enfrenta la teoría de la percolación es siempre la misma: ¿dónde se encuentra el umbral? ¿Cuán trucada ha de estar nuestra moneda para que se abran los enlaces suficientes y podamos garantizar la existencia de una agrupación abierta infinita?





La respuesta depende de la forma de la red, y hallarla no es nada fácil. Incluso en una red cuadrada, el sistema más sencillo posible, demostrar que el umbral se encuentra en 1/2 (es decir, en el equivalente a una moneda justa) supuso un reto de enormes proporciones que no fue resuelto hasta 1980, cuando lo logró el matemático Harry Kesten, de la Universidad Cornell. Y pese a décadas de esfuerzos, hoy solo se conoce el valor exacto del umbral de percolación para unas pocas redes simples. «Se ha trabajado muchísimo en la mera cuestión de hallar el umbral», afirma Robert M. Ziff, físico estadístico de la Universidad de Míchigan. «Es increíble la cantidad de sistemas distintos que se han analizado.» Ziff creó una página de Wikipedia que documenta los umbrales de percolación de cientos de redes diferentes. El de la red triangular se ha determinado de forma analítica y se halla en torno a 0,347, pero la gran mayoría de los valores de esa página (incluido el umbral de una red tridimensional cúbica) son aproximaciones obtenidas a partir de simulaciones informáticas.

REDES EN MALLA

Los retículos constituyen un buen modelo para estudiar la percolación en sistemas físicos como las rocas fracturadas, donde los orificios se hallan en lugares fijos y las grietas entre ellos se forman al azar. Sin embargo, otras redes del mundo real son mucho más complejas. En las redes en malla de FireChat y Bridgefy que mencionábamos al principio, la ubicación de los nodos (los teléfonos de los manifestantes de Hong Kong) cambiaba sin cesar. En estas redes, las conexiones se forman cuando dos teléfonos se sitúan lo suficientemente cerca uno de otro, donde el alcance viene determinado por las decenas de metros que soportan las aplicaciones basadas en Bluetooth con las que se comparten los mensajes. Tales redes se describen con un modelo diferente, conocido como «percolación continua», ya que los nodos pueden encontrarse en cualquier punto de un espacio continuo.

Como cualquier modelo matemático, la versión abstracta de estas redes se basa en simplificaciones. Los teléfonos inteligentes se distribuyen de forma aleatoria, sin imitar las agrupaciones y los patrones naturales que mostraría un mapa de los movimientos de la gente, y dos terminales están conectados o no exclusivamente en función de la distancia que medie entre ellos, sin tener en cuenta las paredes u otros obstáculos. No obstante, el modelo pone de manifiesto el papel clave que desempeña la teoría de la percolación en las redes en malla del mundo real.

Hay dos maneras de aumentar la conectividad de esa red de percolación continua: permitir conexiones directas a distancias mayores, o añadir más teléfonos, con lo que aumenta la densidad de usuarios. Podemos pensar en estas modificaciones en términos de diales como los descritos para la red de tuberías: girar cualquiera de ellos hacia la derecha potenciará la conectividad. Y, según estos modelos, «hay un momento en el que la conectividad pasa de ser local a global», apunta Jahnel.

Para quienes diseñan aplicaciones de redes en malla, hallar el umbral de percolación supone un problema práctico de ingeniería. Cambiar la potencia del dispositivo, que controla el alcance, equivale a girar el dial. Para Ram Ramanathan, científico jefe de la empresa de redes en malla goTenna, la pregunta fundamental es qué potencia de transmisión hay que elegir para obtener una red conectada. La respuesta sería bastante sencilla si la relación entre potencia y conectividad fuera lineal; es decir, si cada pequeño aumento de la potencia produjera un incremento proporcional en la conectividad. Sin embargo, la existencia de un umbral de percolación conlleva un riesgo: la red podría perder la conectividad de repente a medida que la gente se desplaza. Por tanto, la potencia óptima es la que garantiza que la red permanece siempre conectada sin derrochar energía.

El otro dial corresponde a la densidad de teléfonos. Las redes en malla con un alcance fijo necesitan una densidad crítica de usuarios, y es más probable que ofrezcan una conectividad generalizada en eventos multitudinarios, como un festival de música, un partido de fútbol o una gran manifestación. Jorge Ríos, director general y cofundador de Bridgefy, afirma que la empresa registró grandes picos de nuevos usuarios en Cachemira, Nigeria, Hong Kong e Irán durante períodos de revueltas civiles, cuando la gente recurrió a las redes en malla

para preservar las comunicaciones en caso de que el Gobierno bloqueara Internet o las grandes multitudes saturaran las conexiones móviles. Algunos barrios, como el de Red Hook en Brooklyn, usan las redes en malla para ampliar el acceso a Internet estableciendo nodos permanentes en la parte superior de los edificios. Aunque todavía se están desarrollando gran parte de los componentes y las técnicas de enrutamiento necesarias, es fácil imaginar algunas aplicaciones futuristas. Por ejemplo, los vehículos autónomos podrían comunicarse directamente entre sí para compartir información sobre el estado del tráfico o las incidencias en la carretera sin depender de ninguna infraestructura adicional.

REDES DE CONTAGIO

Las redes empleadas para modelizar el flujo de petróleo a través de las rocas o la comunicación directa entre teléfonos imitan la estructura espacial de dichos sistemas: dos nodos estarán unidos por una arista si los objetos que representan se encuentran próximos entre sí en el espacio físico. Pero, en las redes que describen la propagación de una enfermedad, los enlaces vienen determinados por las vías de transmisión del patógeno. Este tipo de redes son especialmente enmarañadas, ya que una persona infectada que pase una hora en una discoteca de una gran ciudad puede transmitir el virus a otra que tal vez lo lleve después hasta la otra punta del país o incluso a otro continente.

Las redes simplificadas ayudan a construir modelos informáticos detallados de redes reales, cuyos resultados ayudan, a su vez, a modificar los modelos de lápiz y papel para obtener más información sobre las redes del mundo real

Los modelos epidemiológicos más sencillos dividen a la gente en tres categorías: vulnerables, infectados y recuperados. Sin embargo, no atienden a la compleja estructura de sus conexiones. En ellos, los infectados contagian de forma aleatoria a otras personas vulnerables bajo el supuesto de que todos los que pertenecen a ese grupo (los estudiantes de una residencia o los habitantes de una ciudad) presentan la misma probabilidad de enfermar. El ritmo al que se contagian las personas vulnerables depende del número básico de reproducción, R_0, que indica la cantidad media de nuevos contagios que provoca cada persona infectada. Si R_0 es mayor que 1, el virus se está propagando; si es menor que 1, el brote se está extinguiendo.

Pero, en la práctica, la forma en que interactúan las personas influye en la transmisión global de la enfermedad. Por ejemplo, la epidemia de síndrome respiratorio agudo grave (SARS) de 2002 inicialmente presentó valores de R_0 entre 2,2 y 3,6. Sin embargo, el número de casos fue «mucho menor del que habríamos esperado durante ese período a partir de un simple cálculo», escribió en 2007 Lauren Ancel Meyers, actual directora del Consorcio de Modelización de la COVID-19 en la Universidad de Texas. La discrepancia, argumentaba, se debía a la suposición de que todas las personas vulnerables tenían la misma probabilidad de infectarse, lo que justamente pasa por alto la complejidad de las redes de contactos entre personas. De hecho, los valores de R_0 calculados para el SARS se habían basado en su rápida propagación en bloques de pisos y hospitales, entornos que presentan tasas anormalmente elevadas de contactos estrechos, por lo que no son aplicables a la población general. Sin embargo, dado que los infectados enfermaban muy deprisa, acababan en el hospital antes de que pudieran contagiar a mucha gente fuera de ellos.

En la red de transmisión de una enfermedad, las aristas expresan relaciones concretas. En una asociada a la propagación del VIH, por ejemplo, dos personas estarán conectadas si han intercambiado fluidos corporales. Pero, en una referida a la COVID-19, las aristas representarán un contacto estrecho sin protección respiratoria, por lo que exhibirán una estructura muy diferente. Los confinamientos, los cierres de negocios y las limitaciones de movilidad alterarán esa estructura. Y, junto con las mascarillas y el distanciamiento físico, impedirán que el virus salte de una persona (un nodo) a otra. Un reto para los epidemiólogos consiste, precisamente, en encontrar medidas que causen una desconexión suficiente de la red.

Las redes de contactos asociadas a las enfermedades del mundo real, como las de propagación de la COVID-19, son muy enrevesadas y difíciles de describir con precisión. Y aunque conociéramos su estructura exacta, estudiarlas matemáticamente tampoco sería nada sencillo. Las simulaciones por ordenador y el análisis de grandes cantidades de datos permiten estimar el número de casos, evaluar el impacto de cambiar la distancia social de uno a dos metros, o cuantificar la influencia de las escuelas o los restaurantes en la transmisión del virus. Alessandro Vespignani, experto en teoría de redes complejas de la Universidad del Nordeste de EE.UU., califica estas investigaciones como su trabajo «en tiempos de guerra»: es táctico y a veces desordenado, pero genera los resultados numéricos inmediatos que necesitan los responsables políticos y el personal sanitario. Según Vespignani, él y sus colaboradores crean una especie de «sociedad sintética» que simula a las personas en un ordenador.

Vespignani habla de su trabajo «en tiempos de paz» para referirse a los períodos en los que se desarrolla el modelo, se evalúan las distintas maneras de modelizar las cosas, se trazan estrategias concretas y se busca la manera de mejorar sus resultados. Y para obtener una comprensión teórica de cómo influye la estructura de una red en la propagación de una enfermedad, los científicos recurren a la teoría de la percolación.

Las herramientas que ofrecen las matemáticas tradicionales de lápiz y papel funcionan solo en los casos más simples, cuando la red exhibe un orden y una simetría artificiales. Aun así, «esas matemáticas son clave para guiar nuestra comprensión», sostiene Vespignani. Para ello, los epidemiólogos de redes reducen la red a sus propiedades esenciales, una de las cuales es su «distribución de grados». El grado de un nodo indica el número de nodos con los que está conectado. En la red cuadrada, por ejemplo, todos los nodos tienen grado cuatro. En cambio, en la red de transmisión de una enfermedad, el grado presenta grandes variaciones, ya que algunas personas tienen una enor-

me cantidad de contactos, mientras que otras pueden hallarse prácticamente aisladas.

La distribución de grados de una red nos da la probabilidad de que un nodo tomado al azar tenga un cierto grado. En las redes de transmisión de enfermedades, eso se traduce en la probabilidad de un individuo de contagiar a un determinado número de personas (o de ser contagiado por ellas). Para entender cómo afecta este aspecto al umbral de percolación, los epidemiólogos matemáticos, como Meyers, generan miles de redes de muestra, las cuales son básicamente aleatorias excepto por una característica: todas presentan la misma distribución de grados. Esta estrategia permite extraer el papel que desempeña la distribución de grados en el comportamiento de la red. Si las propiedades de las redes así generadas concuerdan con las de las redes del mundo real, es probable que la distribución de grados sea relevante para la propagación de la enfermedad, explica Meyers. Si la coincidencia fuese perfecta, «los resultados matemáticos serían justo como los de las simulaciones», añade el experto.

Los estudios demuestran que, en líneas generales, el umbral de percolación de una red disminuye cuando esta presenta una distribución de grados más ancha; es decir, si los grados de los distintos nodos abarcan un intervalo más amplio. Así pues, una enfermedad se propagará con mayor facilidad en una red en la que algunas personas estén muy conectadas y otras muy aisladas, que en una donde todas tengan aproximadamente el mismo número de contactos. Joel Miller, epidemiólogo matemático de la Universidad La Trobe, en Melbourne, explica el fenómeno de manera heurística: «Si tengo 10 veces más contactos que otra persona, presentaré una probabilidad 10 veces mayor de infectarme y una probabilidad 10 veces mayor de contagiar que ella, por lo que seré 100 veces más importante en cuanto a la transmisión de la enfermedad».

REDES DEL FUTURO

La teoría de la percolación sirve para modelizar otros fenómenos de «contagio», como cuando un meme va popularizándose poco a poco en una red social hasta que de repente se hace viral. Puede también aplicarse a modelos económicos para demostrar que un determinado producto llegará a dominar con rapidez el mercado si la gente lo recomienda lo suficiente entre sus contactos. Y los modelos de votantes, donde las personas ejercen una influencia sobre su comunidad, presentan asimismo efectos de umbral.

A diferencia de las redes infinitas y ordenadas que tradicionalmente han estudiado los matemáticos, las derivadas de ejemplos reales tienen una extensión finita y son intrincadas. Las redes finitas no pasan al instante de estar conectadas en pequeños focos a estarlo en casi todas partes. Sin embargo, dicho cambio sí se produce con gran rapidez. Para entender estos procesos, los expertos alternan entre las matemáticas y las simulaciones por ordenador: las redes más simples les ayudan a construir modelos informáticos de redes reales, cuyos resultados ayudan a su vez a modificar los modelos de lápiz y papel para obtener más información sobre las redes del mundo real.

Numerosos modelos de redes que describen la transmisión de la COVID-19 integran información de otras redes. Los sistemas escolares, los trayectos de los trenes y los horarios de los empleados de los hospitales forman redes, y todas ellas influyen en el curso de la pandemia. «Vivimos en un sistema de redes interdependientes y no podemos pensar en una de ellas sin entender las repercusiones de las demás», apunta Raissa D'Souza, experta en teoría de redes complejas de la Universidad de California en Davis. Cada red constituye un sistema complejo distinto con su propio comportamiento emergente, y cada vez es más frecuente acoplar esas redes para crear sistemas aún más complejos. Sin embargo, no existe un marco teórico claro para estudiar tales redes de redes. Entender cómo se ven afectadas las propiedades del conjunto por las de las redes constituyentes es uno de los retos a los que se enfrenta la disciplina.

«No vivimos en una burbuja ni en un mundo totalmente mezclado. Vivimos en un mundo con contactos, seguimos cuentas de Twitter, y esos son ámbitos donde entran en juego la percolación y otros modelos», concluye Vespignani. Comprender mejor esos modelos teóricos puede «marcar la diferencia en el futuro», arguye el investigador. Las redes de percolación son muy adaptables, lo que genera nuevas posibilidades para los matemáticos y aplicaciones prácticas para los científicos. No obstante, todos esos modelos tan diversos comparten un rasgo sorprendente: poseen un abrupto punto de inflexión en el que añadir unas pocas conexiones basta para vincular toda la red. A medida que el mundo se conecta cada vez más, la necesidad de entender esas transiciones será cada vez más imperiosa. IyC

PARA SABER MÁS

Percolation processes I: Crystals and mazes. Simon Ralph Broadbent y John Michael Hammersley en *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 53, págs. 629-641, julio de 1957.

The critical probability of bond percolation on the square lattice equals 1/2. Harry Kesten en *Communications in Mathematical Physics*, vol. 74, págs. 41–59, febrero de 1980.

Contact network epidemiology: Bond percolation applied to infectious disease prediction and control. Lauren Ancel Meyers en *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 44, págs. 63-86, enero de 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Redes sin escala. Albert-László Barabási y Eric Bonabeu en *IyC*, julio de 2003.

La percolación, un juego de mosaicos aleatorios. Hugo Duminil-Copin en *IyC*, enero de 2012.

Un nuevo pilar para la física estadística. Daniel Meyer y Dierk Schleicher en *IyC*, marzo de 2012.

Todo o nada. Bartolo Luque en *IyC*, mayo de 2013.

Leyes universales. Terence Tao en *IyC*, febrero de 2015.

Prever la próxima pandemia. Alessandro Vespignani en *IyC*, julio de 2018.

NEUROCIENCIA

LA ADAPTACIÓN DEL CEREBRO TRAS UN TRASPLANTE DE MANO

La rápida recuperación del tacto y de la capacidad de agarre en antiguos amputados que han recibido un trasplante está demostrando la extraordinaria plasticidad del cerebro

Scott H. Frey

Fotografías de Lyndon French



GRACIAS A UNA MANO AJENA, Donald Rickelman es capaz de tocar y sujetar objetos.

Scott H. Frey es catedrático de neurociencias cognitivas en la Universidad de Misuri, donde dirige el Laboratorio de Neurociencia de la Rehabilitación.



En febrero de 1964, el ecuatoriano Roberto Gilbert Elizalde, cirujano formado en la Clínica Mayo pero con ejercicio en su Guayaquil natal, encontró al candidato idóneo para el prodigio que venía preparando en el laboratorio. Julio Luna era un marinero de 28 años que había perdido la mano derecha por la explosión de una granada. Inspirándose en el trasplante de un riñón realizado con éxito en los Estados Unidos, Gilbert se propuso implantarle a Luna la mano de un paciente que acababa de fallecer.

Nueve largas horas trabajó el equipo de Gilbert para preparar el miembro maltrecho de Luna, antes de proceder a unir metódicamente sus huesos, tendones, vasos, músculos y piel con el antebrazo de un jornalero que había muerto de una hemorragia estomacal. Aplicando las últimas técnicas de microcirugía, suturaron los delicados fascículos nerviosos con la esperanza de que, en los meses siguientes, las fibras motrices y sensitivas crecieran desde el antebrazo de Luna hasta inervar la nueva extremidad en toda su extensión.

Agotados, cuando llegó la hora de retirar las pinzas de hemostasia, contuvieron el aliento con angustia hasta que la sangre de Luna regó la mano inerte, devolviéndole el color y la vida. Se sucedieron las llamadas de larga distancia para felicitarlos, y al día siguiente la noticia estaba en el *New York Times*: «Trasplantada a un hombre la mano de un fallecido». Se convirtió así en una de las primeras partes del cuerpo humano en ser trasplantadas, después del riñón y la córnea. El salto era muy arriesgado: «Varios especialistas consultados ayer aseguraban que las posibilidades de que el éxito fuera definitivo eran bajísimas», advertía el rotativo neoyorquino.

Durante la primera semana, parecía que los escépticos se habían equivocado. Cuando Luna contraía los músculos del antebrazo, los tendones de la nueva mano movían los dedos. Le administraron uno de los primeros inmunodepresores, la azatioprina, para prevenir el rechazo, pero en la segunda semana quedó patente que no bastaría con eso. Cuando apareció la gangrena, hubo que enviarlo a Boston, donde fracasó el último intento por salvarle la mano. A los 23 días de la primera operación, Luna volvía a ser un amputado.

La clase médica alabó y reprobó a Gilbert por igual. Los detractores tacharon la operación de antiética, peligrosa e inútil, porque no era necesaria para salvarle la vida a Luna, una postura que todavía sostienen hoy algunos expertos en relación con los trasplantes de mano. Tuvieron que pasar tres decenios para que volviese a contemplarse este tipo de cirugías.

A lo largo de esos años, las técnicas quirúrgicas evolucionaron, mientras que el desarrollo de inmunodepresores más eficaces (primero la ciclosporina y luego la rapamicina y el tacrólimus) permitió que el trasplante de algunos órganos sólidos (riñón, hígado, corazón) se convirtiese en algo casi rutinario. En los noventa, estos potentes fármacos alentaron la esperanza en torno a los injertos de tejidos múltiples: muscular, óseo, cutáneo, nervioso y vascular. Así nacía el campo de los alotrasplantes de tejidos compuestos. En 1998, un equipo francés practicó el segundo trasplante de mano de la historia, y poco después se repetía la hazaña en el Hospital Judío de

EN SÍNTESIS

El trasplante de mano es una intervención compleja y conlleva una recuperación larga y difícil. Su éxito no radica solo en impedir el rechazo, sino en la funcionalidad que adquieren los pacientes con la mano trasplantada.

Mediante resonancia magnética funcional se está investigando el modo en que se reconfigura el cerebro después de una amputación y después de un trasplante de mano.

Los datos están demostrando que el cerebro se adapta con rapidez al restablecimiento de los estímulos muchos años después de haber quedado anulados. Esta elevada neuroplasticidad permite albergar esperanzas a las personas que han sufrido amputaciones o traumatismos graves.

Louisville, en Kentucky: el receptor, Matthew Scott, que pronto celebrará el 22.º aniversario de aquella operación, todavía conserva la mano.

Aun así, el trasplante de mano sigue siendo una intervención experimental y suscita polémica en algunos círculos. En todo el mundo se han realizado poco más de cien. A diferencia de otros trasplantes, el de mano no salva la vida. La operación es muy complicada y el proceso de recuperación es largo y difícil. Además, hay que medicarse de por vida con inmunodepresores, que pueden provocar disfunciones orgánicas e incrementan el riesgo de cáncer y otras enfermedades. David Savage, por ejemplo, del cual daré más detalles a continuación, falleció 12 años después de un trasplante, a causa de un cáncer posiblemente relacionado con la medicación.

En vista de todo eso, ¿por qué no usar prótesis? Cuando se lo pregunté a Erik Hondusky, receptor de un trasplante de mano, me contestó sin rodeos: «Porque el mundo está hecho para dos manos». La respuesta de Hondusky refleja la insatisfacción de otros trasplantados con las prótesis, así como su intenso deseo de sentirse completos otra vez. Las prótesis son artefactos insensibles: no sirven para percibir la delicadeza con la que cede una telaraña al tocarla, el diminuto relieve de la F y la J en el teclado ni los sutiles cambios de temperatura en una taza de café. Por desgracia, Erik contrajo una infección subcutánea que obligó a amputarle la mano nueve años después del trasplante. Lleva prótesis a desgana, solo para ir en moto.

Las prótesis de miembros superiores también tienen sus inconvenientes. A pesar de los grandes avances técnicos, el porcentaje de amputados que reniega de ellas sigue siendo alto. Nuestra colaboradora en Louisville, Christina Kaufman, señala que los resultados quirúrgicos de los trasplantes de mano, así como las bajas tasas de rechazo, son impresionantes: cerca del 80 por ciento de los trasplantados conserva la mano a los cinco años. Se prevé que este porcentaje aumente todavía más, junto con el número de receptores, a medida que mejore el estudio de la compatibilidad inmunitaria con el donante. Así, el éxito del trasplante ya no radica solo en impedir el rechazo, sino en el grado de funcionalidad que adquieren los pacientes en la mano trasplantada. Y es aquí donde entran en juego las neurociencias.

Los resultados quirúrgicos son impresionantes: el 80 por ciento de los trasplantados conserva la mano al cabo de cinco años

LA AMPUTACIÓN Y EL CEREBRO

Mi curiosidad por entender cómo controla el cerebro las manos viene de muy atrás. Surgió al observar las dificultades que sufría mi madre en su día a día por causa de la esclerosis múltiple, la enfermedad autoinmunitaria que destruye las vainas de mielina (los recubrimientos lipoproteicos de las neuronas del cerebro y la médula espinal). Su discapacidad manual, desequilibrio, debilidad muscular y espasticidad perduran en mi recuerdo e impulsan mi búsqueda. El cerebro dedica gran parte de su territorio a planificar y controlar las acciones de las manos, vastos feudos que estudiamos en mi laboratorio desde hace más de veinte años. Investigamos los mecanismos neurológicos del movimiento de las manos mediante resonancia magnética funcional (RMf), una técnica de imagen que nos permite estudiar las funciones encefálicas a partir de las fluctuaciones locales del flujo sanguíneo y la oxigenación, que se asocian a las variaciones de la actividad neuronal.

A efectos prácticos, la RMf funciona así: imaginemos a un voluntario de uno de estos experimentos —aburridísimos, por cierto—, en el que le pedimos que a ratos dé unos golpecitos con los dedos sobre una superficie y otros ratos se quede quieto sin hacer nada. Cuando mueve los dedos de la mano derecha, una población de neuronas especializadas, en el área motora de la corteza izquierda (cada hemisferio del cerebro controla el lado contrario del cuerpo) produce unos impulsos descendentes, denominados «potenciales de acción», que atraviesan las estructuras profundas del cerebro y bajan por la médula espinal. Cuando llegan a los nervios periféricos, los accionan para contraer los músculos de la mano y el antebrazo. Los movimientos de los dedos estimulan unos receptores especializados situados en la piel, los tendones y las articulaciones, que, a su vez, emiten sus propias señales ascendentes, a través de los nervios periféricos hasta la médula espinal; desde allí, estas señales suben hasta las estructuras subcorticales y el área asociada a la mano en la corteza somatosensorial izquierda, donde las recibe el grupo de neuronas encargadas de procesar las señales sensoriales.

Toda esta actividad consume energía. En fracciones de segundo, los minúsculos capilares se dilatan y saturan de sangre oxigenada las zonas del cerebro más activas. Estos cambios en las concentraciones locales de oxígeno afectan al campo magnético de la RMf. El campo magnético atrae con fuerza a la hemoglobina cuando esta no transporta oxígeno (estado paramagnético), pero la repele débilmente cuando está oxigenada (estado diamagnético). Estos efectos pueden observarse como señales de la actividad neuronal ligadas a la concentración sanguínea de oxígeno. Cuando el voluntario tamborilea con los dedos sobre la mesa, las zonas asociadas a la mano, en la corteza cerebral izquierda, se encienden en la pantalla del escáner.

La RMf también detecta esta actividad en el cerebro de personas a las que les han amputado una mano. Muchos amputados experimentan el fenómeno conocido como «miembro fantasma», la sensación ilusoria pero vívida de que el miembro sigue presente. Si el investigador le pide al amputado que mueva los dedos del miembro fantasma, la RMf detecta un pico de actividad en las áreas del cerebro que controlaban la mano. Estas observaciones indican que, al menos en algunos casos, el cerebro conserva una representación de la mano amputada aunque físicamente ya no esté. Pero la cosa no es tan fácil.

Décadas de investigación básica en animales demuestran que la configuración de la corteza cerebral cambia radicalmente cuando se extingue la actividad neurológica de un miembro, si se lesionan los nervios periféricos, por ejemplo. Esto significa que los mapas de las funciones sensitivas y motrices de la corteza dependen de su estimulación. Al menos en parte, parece que en los humanos ocurre lo mismo. Cuando un amputado realiza

una tarea con la mano intacta, se observa un incremento de la actividad en las áreas de la corteza que antes controlaban la mano ausente. Esta actividad de las áreas motoras y sensitivas correspondientes a la mano inexistente se suma a la actividad normal de la mano sana. De la misma manera, algunos estudios de imagen han mostrado que, en los amputados, los movimientos de los labios también aumentan la actividad de las zonas antes dedicadas a la mano.

En este punto, el trasplante de manos cobra especial interés para un neurocientífico. ¿Conserva suficiente plasticidad el cerebro humano maduro, años y hasta décadas después de la amputación, como para asumir el control de una mano trasplantada? La respuesta podría tener grandes implicaciones a la hora de determinar el potencial de recuperación funcional tras un traumatismo o una lesión medular o incluso cerebral.

RECUPERACIÓN CEREBRAL

Comencé a explorar este asunto cuando David Savage y su mujer, Karen, acudieron a mi laboratorio, por entonces en la Universidad de Oregón, apenas cuatro meses después de que a David le trasplantaran una mano en el Hospital Judío de Louisville. Si hay un caso que cuestione los límites de la recuperación neuronal, sin duda es el de David. Había perdido la mano de joven, en un accidente, y llevaba 35 años viviendo sin ella cuando le trasplantaron una nueva. Mientras conversábamos, se desabrochó el velcro de la férula y se puso tan pancho a abrir y cerrar la mano. Al ver mi cara de pasmo, sonrió, me cogió el bolígrafo y escribió su nombre en mi cuaderno. De inmediato quedó claro quién era allí el maestro y quién el alumno.

Antes de entrar a fondo en los asombrosos resultados de David, tenemos que hacer un breve inciso sobre los nervios periféricos de la mano y el brazo. A diferencia del encéfalo y la médula espinal, los nervios periféricos pueden regenerarse después de una lesión. Y hay que decir que lo hacen rapidísimo: a la increíble velocidad de dos milímetros por día. El microcirujano prepara este proceso separando con cuidado los fascículos que componen el nervio y empalmándolos con los de la mano trasplantada. Estos fascículos comprenden enormes cantidades de axones (las prolongaciones de las neuronas), como los conductos llenos de cables telefónicos multicolores que despuntan en un edificio en construcción. Una vez empalmados, los fascículos guían a los axones motores que van regenerándose hacia los músculos de la mano, donde forman conexiones neuromusculares. De la misma manera, los axones que envían señales sensitivas crecen hacia la piel, los tendones y las articulaciones. Allí, producen receptores especializados, sensibles a los cambios de presión, vibración y temperatura. El proceso por el cual se regeneran los nervios periféricos y vuelven a unirse a la red sensitiva se denomina reinervación.

Pero por muy hábil que sea el microcirujano, poco puede hacer para determinar hasta dónde llegarán los axones en la mano trasplantada. Por eso, los errores en la reinervación dificultan la recuperación funcional. En el antebrazo de David, los nervios sensitivos habían cruzado el empalme fascicular. Por el camino, algunos se desviaron e inervaron pequeñas parcelas de la piel de la palma. Lo sabemos porque, en aquella etapa tan temprana de su recuperación, David ya era capaz de detectar y ubicar suaves estímulos táctiles en la base del pulgar, aunque el resto de la mano permanecía insensible. Todo eso me pareció fascinante. Su cerebro recibía los impulsos de unos nervios periféricos que no habían transmitido señales en más de treinta años. La comunicación procedía de receptores especializados que apenas acababan de arraigar en una mano totalmente ajena.

Los errores de reinervación eran un escollo para David, pero su cerebro encontró maneras de compensarlos. Podía darse el caso de que un nervio sensitivo del antebrazo, que en otro tiempo hubiese transmitido los impulsos generados en el pulgar, ahora estuviese transportando señales procedentes de una zona completamente distinta de la mano trasplantada. De alguna forma, en muy poco tiempo el cerebro de David había aprendido a interpretar los nuevos impulsos correctamente; al tocarle la palma, sentía el estímulo ahí y no en otra parte, como el pulgar. Las percepciones estaban unos milímetros desviadas, pero aun así eran muy precisas si se tiene en cuenta que David había pasado más de seis lustros sin mano derecha. No está claro cómo resuelve el cerebro este desarreglo. Nuestra hipótesis es que, al emparejar reiteradamente los impulsos táctiles con los visuales (es decir, cuando al utilizar la mano vemos y notamos lo que tocamos), los mecanismos cerebrales aprenden a corregir el error de inervación.

Al emparejar reiteradamente los impulsos táctiles con los visuales, el cerebro aprendería a corregir los errores de reinervación después del trasplante

Como si hubiese estado todo ese tiempo esperando la oportunidad de volver a procesar señales, la corteza sensitiva de David reaccionó enérgicamente en la RMf cuando le apliqué un cepillo sobre la mano trasplantada. Eso no quiere decir que la reconfiguración posterior a la amputación hubiese quedado anulada por completo. Al igual que en otros amputados, al pasarle el cepillo por la mano izquierda intacta, la misma área (la corteza sensitiva derecha) también reaccionaba. Pero David no dudaba en ningún momento de dónde provenían las sensaciones: si de la mano intacta o de la trasplantada.

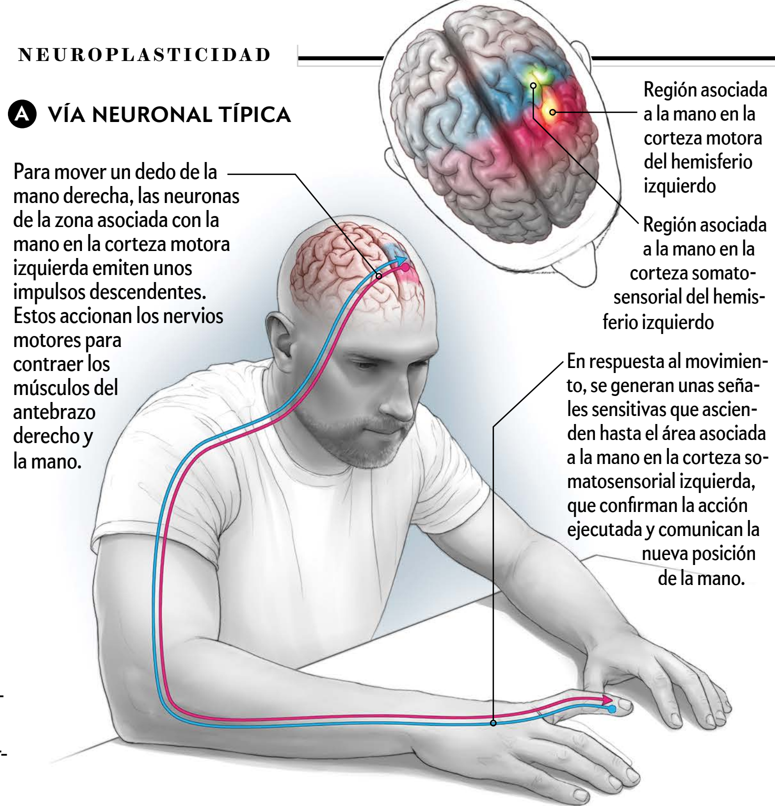
David falleció de cáncer, pero la mano trasplantada puede durar décadas sin consecuencias aparentes. Más de 21 años después de su operación, Matthew Scott (el primer caso de Louisville) es la persona que más tiempo ha conservado una mano trasplantada. Pasó 13 años sin la mano izquierda dominante, que perdió en un accidente de pirotecnia cuando contaba poco más de veinte años. Nos visitó en 2008, nueve años y medio después del trasplante. Hacía tiempo que había adquirido la sensibilidad en toda la mano, lo que significaba que los nervios sensitivos habían finalizado su viaje de regeneración. Era capaz de localizar el tacto en todas las partes de la mano nueva; por término medio, solo fallaba unos milímetros en comparación con la mano

La delicada reconfiguración neuronal

Las lesiones sufridas en los nervios periféricos pueden alterar el sistema de mando que conecta el cerebro con la mano, gracias al cual somos capaces de llevarnos un tenedor a la boca sin pensárnoslo dos veces. A la hora de restablecer las conexiones nerviosas, la cirugía de trasplante de mano se enfrenta a las reconfiguraciones que pueden haberse producido después de la amputación.

Para entender este problema, primero veamos lo que ocurre normalmente cuando movemos un dedo de la mano derecha Ⓐ. Comparemos ahora ese funcionamiento normal con tres variantes de reconfiguración después de perder una mano Ⓑ. Las investigaciones indican que, al menos en algunos casos, el cerebro sigue representándose la mano amputada, aunque físicamente ya no esté. Sin embargo, en muchos amputados la corteza cerebral se reconfigura radicalmente cuando desaparece la actividad de los nervios periféricos.

Ⓐ VÍA NEURONAL TÍPICA



Ⓑ VÍAS NEURONALES EN EL AMPUTADO

VARIANTE 1

Muchos amputados experimentan las sensaciones del «miembro fantasma». Si se les pide que muevan un dedo que ya no está, aseguran que «sienten» los movimientos de los dedos fantasma. Lo mismo ocurre si se les activa el área motora asociada a la antigua mano mediante estimulación magnética transcraneal.

VARIANTE 2

En algunos amputados, las señales se entrecruzan. La región de la corteza cerebral asociada a la mano se activa cuando la persona mueve los labios. La actividad aumenta no solo dentro de las áreas motoras y sensitivas asociadas con la cara, que es lo normal, sino también en las que controlaban los movimientos manuales antes de la amputación, en el hemisferio contralateral.

VARIANTE 3

Cuando el amputado realiza tareas con la mano intacta, se observa un incremento de la actividad en el área neuronal adecuada, pero también en las que antes estaban asociadas con la mano amputada, en el hemisferio contralateral.

DAVID CHENEY (*ilustración*)



CON LA MANO TRASPLANTADA, Rickelman se abrocha hábilmente los botones de la camisa.

indemne. Diseñamos un sistema informático para estimularle la yema de los dedos en una sesión de RMf y descubrimos que cada dedo se correspondía con un mapa distinto en el área de la corteza sensitiva asociada a la mano.

Estoy tentado de creer que la organización de la corteza sensitiva de Matthew había regresado al estado previo a la amputación, pero podría ser una conclusión precipitada. No disponemos de datos de antes de la amputación y la realidad es que todos tenemos pequeñas variaciones en las redes cerebrales, diferencias que dependen de la genética y de la experiencia personal de cada uno. Lo que sí podemos afirmar sin reservas es que la corteza sensitiva de Matthew ha cartografiado la mano trasplantada dentro de los parámetros normales para un adulto sano. Con todo, ocho años después del trasplante, su cerebro todavía presenta signos residuales de la amputación. Al estimularle la mano derecha intacta, también aumenta la actividad en el área de la mano izquierda que perdió. ¿Cómo es posible, entonces, que su destreza manual sea tan buena? En parte, quizá se deba a la contribución de otras regiones del cerebro, más allá de la vía sensitiva de la mano, que no intervienen directamente en las funciones sensoriales y motrices.

Una tarea sencilla como dar golpecitos con los dedos o una experiencia pasiva como el tacto nos sirven para estudiar la organización de la corteza motora y sensorial, pero la vida cotidiana requiere la capacidad de asir y manipular objetos. Se trata de acciones complejas, dirigidas a objetivos, en las que participan áreas del cerebro de un nivel superior, como las zonas parietal y premotora. Estas regiones corticales utilizan la información multisensorial sobre las propiedades del objeto y el posicionamiento del cuerpo para planificar movimientos dirigidos a un objetivo concreto, como sujetar una taza para dar un sorbo de café.

En nuestro laboratorio, Ken Valyear dirigió un proyecto en el que utilizaron técnicas de RMf y captura de movimientos para estudiar la recuperación de la función prensil, guiada por la vista, de Donald Rickelman, que había vivido 14 años sin la mano izquierda tras perderla en un accidente laboral. Nos interesaba especialmente la corteza intraparietal anterior (CIPa), una pequeña región situada detrás del área sensitiva que interviene para amoldar la mano a la forma, la orientación y el tamaño percibido de los objetos.

Al igual que los demás trasplantados que hemos estudiado, Donald presentaba signos residuales de reorganización en las áreas motoras y sensitivas asociadas a la mano, tanto a los 26 como a los 41 meses del trasplante. No es extraño, pues, que tuviese dificultades persistentes en algunas funciones básicas. Durante ese lapso de tiempo, no obstante, el análisis detallado de sus movimientos, registrados en alta resolución, reveló una mejora sustancial de la coordinación del alcance y la prensión. ¿Cómo compensaba los impedimentos motores y sensitivos? Para averiguarlo, construimos un aparato que nos permite formular esta pregunta en el lenguaje de la RMf. Cuando Donald agarraba un objeto a los 26 meses del trasplante, el nivel de actividad relacionada con la función prensil en la CIPa y la corteza premotora era bajo en comparación con las personas sin amputaciones. A los 41 meses, este nivel había aumentado y se aproximaba más al de las personas sin amputaciones. Creemos que las funciones de prensión y alcance de la mano trasplantada habían mejorado porque estas regiones de nivel superior se estaban encargando de hacer el trabajo de las áreas motoras y sensitivas reorganizadas.

Las funciones motrices y sensitivas de Donald y Matthew siguen mejorando muchos años después de sus respectivos trasplantes, lo cual indica que los cambios en el cerebro continúan contribuyendo a la recuperación mucho después de que los nervios periféricos terminen de regenerarse. Uno de nuestros principales objetivos ahora es determinar la relación entre estos cambios cerebrales, que dependen de la experiencia, y el uso de las manos en la vida real, con sensores portables y mediciones telemáticas. Estos dispositivos nos permiten observar, con gran resolución, la actividad de la mano y de las prótesis, día a día, mientras el paciente se ocupa de su quehacer cotidiano.

El estudio de los trasplantados de mano obliga a replantear nuestras nociones fundamentales sobre la neuroplasticidad en los adultos de mediana edad

Si el superpoder de los nervios periféricos es la capacidad de regenerarse, el superpoder del cerebro es la capacidad de reconfigurarse en respuesta a los estímulos. Ambos superpoderes se complementan en la recuperación de las lesiones físicas. Aunque sea incipiente, el estudio de los trasplantados de mano ya nos enseña que el cerebro es capaz de responder al restablecimiento de los estímulos muchos años después de haber quedado suprimidos. Estos hallazgos hacen que repensemos nuestras nociones sobre los límites de la neuroplasticidad en los adultos de mediana edad y ofrecen esperanza a las personas que sufren una amputación u otros traumatismos graves. Es muy posible, en efecto, que consigamos restaurar el tacto y el agarre perdidos décadas atrás.

PARA SABER MÁS

The science of reconstructive transplantation. Brandacher, Gerald (Ed.). Humana Press, 2015.

Hand and upper extremity transplantation: An update of outcomes in the worldwide experience. Jaimie T. Shores et al. en *Plastic and Reconstructive Surgery*, vol. 135, n.º 2, págs. 351e-360e, febrero de 2015.

Interhemispheric transfer of post-amputation cortical plasticity within the human somatosensory cortex. Kenneth F. Valyear et al. en *NeuroImage*, vol. 206, artículo n.º 116291, febrero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Conexiones biónicas. D. Kacy Cullen y Douglas H. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

Prótesis más sensibles. Roberta Kwok en *MyC*, n.º 7, 2014.

Videojuegos para la rehabilitación motora. Matthis Synofzik y Winfried Ilg en *MyC*, n.º 77, 2016.

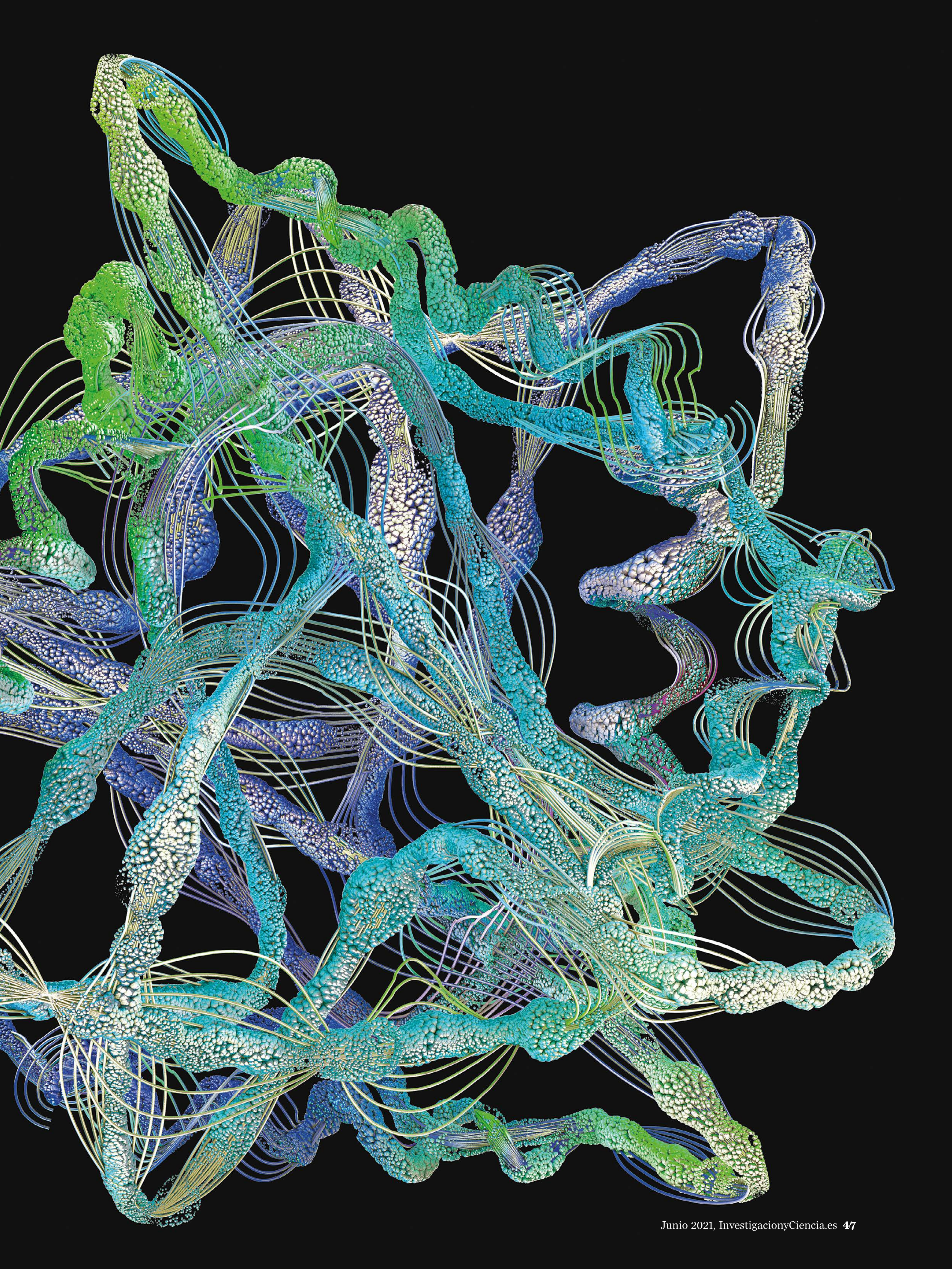
BIOLOGÍA CELULAR

Condensados biomoleculares: una nueva fuente de organización celular

En el interior de las células, diminutas gotas de proteínas y de otras biomoléculas se fusionan, dividen y disuelven en una coreografía que parece regular procesos vitales

Viviane Callier

LAS PROTEÍNAS, como la ilustrada aquí, pueden agruparse o interaccionar entre sí de diferentes maneras, lo que determina en gran medida las funciones que pueden ejercer en la célula.



Viviane Callier, graduada en biología, trabaja como redactora científica en el Instituto Nacional del Ojo de EE.UU. y colabora con varias publicaciones científicas.



Imaginemos que empaquetamos a todas las personas del mundo en el Gran Lago Salado de Utah, tan apiñadas que el más mínimo movimiento se transmitiría de unas a otras a toda velocidad. Así es como se encuentran los 5000 millones de proteínas que hay en una célula corriente, según Anthony Hyman, director del Instituto Max Planck de Biología Celular, Molecular y Genética, en Dresde.

Para que la célula crezca, se divida y sobreviva en este citoplasma tan concurrido, es necesario que las enzimas se topen con su sustrato y las moléculas de señalización localicen a su receptor. Si las células fueran meras bolsas que contuvieran una mezcla homogénea de citoplasma, tales encuentros resultarían muy difíciles. Afortunadamente no es así: los orgánulos rodeados de membranas organizan parte del contenido citoplasmático al compartimentar ciertos materiales y proporcionar superficies que favorecen los procesos importantes, como la producción de ATP (el combustible de las células). Pero ahora se está empezando a vislumbrar que los orgánulos no constituyen más que una de las fuentes de orden.

Experimentos recientes han revelado que algunas proteínas se juntan espontáneamente en grupos transitorios, denominados condensados, en respuesta a fuerzas moleculares que equilibran con precisión la transición entre la formación y la disolución de microgotas intracelulares. Los condensados, a los que se refiere a veces como orgánulos sin membrana, aíslan determinadas proteínas del resto del citoplasma, lo que evita las reacciones indeseadas y aumenta enormemente la eficacia de las que resultan útiles. Estos descubrimientos están trastocando lo que creíamos saber sobre el funcionamiento interno de las células.

La existencia de los condensados explicaría, por ejemplo, la rapidez de numerosos procesos celulares. Para Hyman, «el secreto de los condensados es que no constituyen una fábrica, sino más bien una movilización espontánea (*flashmob*), como cuando suena la música y aparecen los bailarines, pero desaparecen en cuanto deja de sonar».

El biólogo celular Gary Karpen, que trabaja en la Universidad de California en Berkeley y en el Laboratorio Estadounidense Lawrence Berkeley, sugiere que el mecanismo por sí solo es sumamente regulable: los condensados se forman y disuelven muy rápido con tan solo cambiar la concentración de las moléculas o por la modificación química de las proteínas. Esta precisión aporta ventajas reguladoras ante muchos otros fenómenos, entre ellos la expresión génica.

La primera pista de este mecanismo llegó el verano de 2018, cuando Hyman y su por entonces becario posdoctoral Cliff Brangwynne (hoy en el Instituto Médico Howard Hughes de la Universidad de Princeton) estaban impartiendo el famoso curso de fisiología del Laboratorio de Biología Marina, a la vez que investigaban el desarrollo embrionario del nematodo *Caenorhabditis elegans*. Junto con los estudiantes, se dieron cuenta de que los agregados de ARN en el óvulo fecundado del gusano generaban microgotas que se dividían o se fusionaban entre sí. Ello les llevó a plantear la hipótesis de que estos agregados, denominados «gránulos P», se formaban por la separación de fases en el citoplasma, igual que las gotas de aceite en una vinagreta.

Su propuesta, publicada en 2009 en *Science*, no llamó mucho la atención por entonces. Pero a partir de 2012 empezaron a aparecer otros artículos sobre la separación de fases dentro de la célula. Uno de ellos fue un experimento clave del laboratorio de Michael Rosen, del Centro Médico del Sudoeste de la Universidad de Texas, en Dallas, en el que se demostró que las proteínas de señalización celular también presentaban el fenómeno de la separación de fases. Hacia 2015, el goteo de artículos se había convertido en un torrente y, desde entonces, las investigaciones sobre los condensados biomoleculares, esos compartimentos celulares seudolíquidos con propiedades viscoelásticas, están inundando las revistas.

En la actualidad, los biólogos celulares se topan con condensados allá donde miren: en la regulación de la expresión

EN SÍNTESIS

En las células, algunas proteínas y otras biomoléculas se agregan con rapidez y generan condensados aislados del resto del citoplasma, lo que evita las reacciones bioquímicas indeseadas y aumenta la eficacia de las útiles.

Descubiertos hace algo más que una década, los condensados parecen intervenir en numerosos aspectos de la biología celular, como la expresión génica, la síntesis de proteínas, la señalización entre células, la polimerización de las proteínas del citoesqueleto o la formación de agregados anómalos en las enfermedades neurodegenerativas.

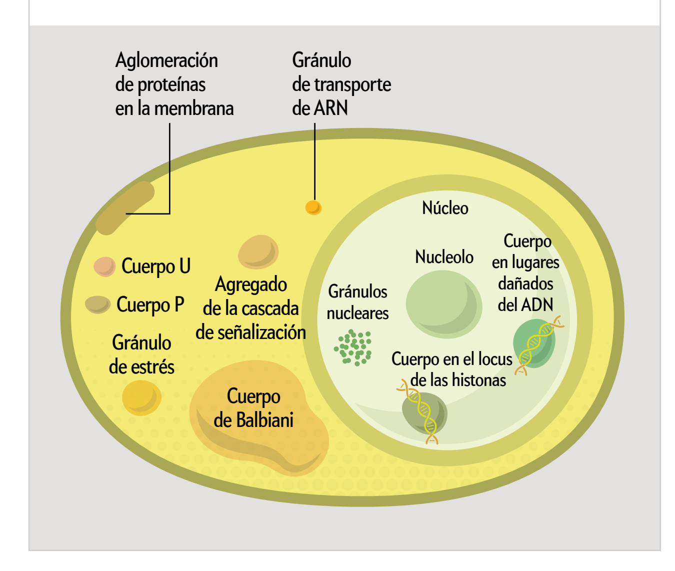
Estos hallazgos, que se han ido acumulado en los últimos años, están trastocando nuestro conocimiento sobre lo que sucede en el interior de las células.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/CHRISTOPH BURGSTEDT/ISTOCK

DENTRO DE LA CÉLULA

Distintos tipos de condensados

En las células complejas, la separación de fases hace que las proteínas y otras moléculas se agreguen en cuerpos líquidos, o condensados, que ejercen distintas funciones. Aquí se muestran algunos tipos de ellos.



SAMUEL VELASCO/QUANTA MAGAZINE, A PARTIR DE «BIOMOLECULAR CONDENSATES: ORGANIZERS OF CELLULAR BIOCHEMISTRY», DE SALMAN F. BANANI ET AL. EN *NATURE REVIEWS MOLECULAR CELL BIOLOGY*, VOL. 18, PÁGS. 285-298, FEBRERO DE 2017.

génica, en la formación del huso mitótico, en el ensamblaje de los ribosomas y en muchos más procesos celulares del núcleo y del citoplasma. La novedad de estas estructuras invita a cavilar: el concepto central de la biología de los condensados se articula en torno a la idea de que su función surge del comportamiento colectivo de las moléculas, algo bastante alejado del modelo clásico, en el que un agente bioquímico y su diana encajaban como una llave en su cerradura. Los investigadores siguen dándole vueltas a cómo demostrar la funcionalidad de estas propiedades emergentes; para ello habrá que desarrollar nuevas técnicas con las que medir y manipular la viscosidad, así como otras propiedades de las microgotas en el interior de la célula.

¿QUÉ DESENCADENA LA FORMACIÓN DE MICROGOTAS?

Cuando los biólogos comenzaron a intentar explicar por qué hay condensación en las células vivas a través del fenómeno de separación de fases, parecía natural empezar a indagar en la estructura de las propias proteínas. Cuando estas se hallan bien plegadas, suelen separar los aminoácidos hidrófobos de los hidrófilos: los primeros tienden a ocultarse por sí solos en el interior del plegamiento, alejados de las moléculas de agua, mientras que los segundos son empujados hacia la superficie. De estos dos tipos de aminoácidos depende el plegamiento de la proteína y el mantenimiento de su forma.

Pero la secuencia de algunas proteínas contiene relativamente pocos aminoácidos hidrófobos, por lo que no necesitan plegarse. En lugar de ello, estas proteínas dúctiles (en inglés, *intrinsically disordered proteins*) fluctúan entre varias formas y establecen bastantes interacciones multivalentes débiles con otras moléculas. Durante años se pensó que la mejor explicación sobre el comportamiento de las microgotas seudolíquidas se hallaba en las interacciones de las proteínas dúctiles.

Sin embargo, el año pasado, Brangwynne publicó un par de artículos en los que, si bien destacaba la relevancia de las proteínas dúctiles, consideraba que se les había atribuido demasiada importancia. Según él, la mayoría de las proteínas de los condensados tienen el mismo diseño a base de dominios estructurados y regiones desordenadas. Para iniciar los condensados, las moléculas deben establecer numerosas interacciones multivalentes débiles entre sí, y el único modo de conseguirlo es por oligomerización.

La oligomerización tiene lugar cuando las proteínas se unen unas con otras y forman oligómeros, complejos más grandes a base de unidades repetitivas. A medida que aumenta la concentración de las proteínas, también lo hacen la separación de fases y la formación de oligómeros. En la reunión de diciembre pasado de la Sociedad Estadounidense de Biología Celular, Brangwynne demostró que cuando se incrementa la concentración de los oligómeros, la fuerza de sus interacciones acaba superando la barrera de la nucleación (la energía necesaria para crear una superficie que separe el condensado del resto del citoplasma). En este punto, las proteínas quedan contenidas dentro de una microgota.

En los últimos cinco años se ha avanzado mucho en el conocimiento del comportamiento colectivo de las proteínas a partir de sutiles interacciones físicas y químicas. Pero seguimos sin saber cómo utilizan en realidad las células este fenómeno (si es que lo hacen) para crecer y dividirse.

CONDENSADOS Y EXPRESIÓN GÉNICA

Los condensados parecen intervenir en numerosos aspectos de la biología celular, pero unos de los que han recibido especial atención son la expresión génica y la síntesis de proteínas.

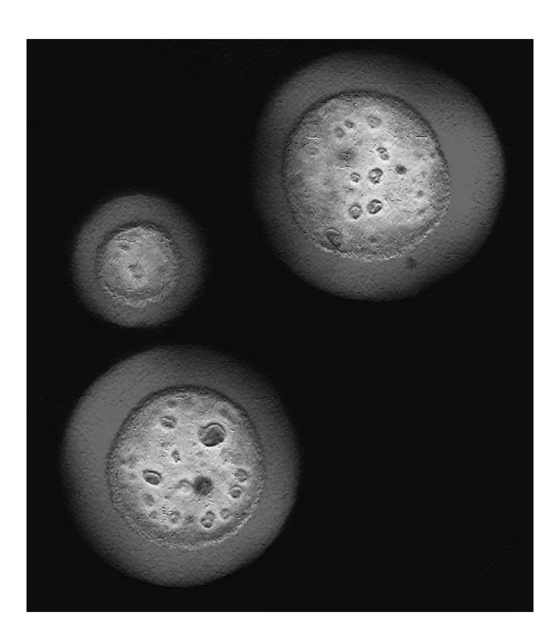
Los ribosomas son los orgánulos encargados de fabricar las proteínas, y su abundancia suele determinar la velocidad de crecimiento de la célula. El trabajo de Brangwynne y otros sugiere que las células que crecen con rapidez podrían recibir cierta ayuda del condensado más grande del núcleo: el nucleolo. Este facilita la transcripción rápida de los ARN ribosómicos al reunir toda la maquinaria necesaria para la transcripción, como la enzima misma que los sintetiza (la ARN polimerasa I).

Hace pocos años, Brangwynne y Stephanie Weber, investigadora posdoctoral que trabajaba por entonces con él, examinaron el modo en el que se controlaba el tamaño del nucleolo (y, por lo tanto, la velocidad de la síntesis del ARN ribosómico) durante las primeras fases embrionarias de *C. elegans*. Puesto que la madre destina el mismo número de proteínas a cada embrión, la concentración de estas es elevada en los embriones pequeños, mientras que en los grandes se diluye. Y, según describieron en 2015 en un artículo de *Current Biology*, el tamaño del nucleolo también varía con la concentración: aumenta en las células pequeñas (que presentan mayor concentración de proteínas) y se reduce en las grandes (donde esta es menor).

Brangwynne y Weber descubrieron que, si modificaban artificialmente el tamaño de la célula, lograban aumentar o disminuir la concentración de las proteínas y el tamaño del nucleolo resultante. De hecho, cuando hacían disminuir la concentración por debajo de un umbral crítico, no había ninguna separación de fases ni ningún nucleolo. Basándose en la física de la formación de condensados, los investigadores dedujeron un modelo matemático que podía predecir con exactitud el tamaño de los nucleolos.

En la actualidad, Weber está buscando condensados en las bacterias, que son más pequeñas y carecen de compartimentos delimitados por membranas. Su propuesta es que «quizá sea un mecanismo incluso más importante para la compartimentación, porque [las bacterias] no tienen otra alternativa».

En un estudio publicado el pasado verano, Weber demostró que, en el citoplasma de las bacterias de *E. coli* que crecen despacio, la ARN polimerasa se distribuye de modo uniforme; en cambio, en las que crecen deprisa la enzima se aglomera en microgotas. Estas últimas tal vez necesitan concentrar la polimerasa en torno a los genes de los ARN ribosómicos para que se sinteticen con eficacia. «Parece que [la separación de fases] está en todos los dominios de la vida y constituye un mecanismo universal que ha llegado a especializarse en numerosas funciones», comenta Weber.

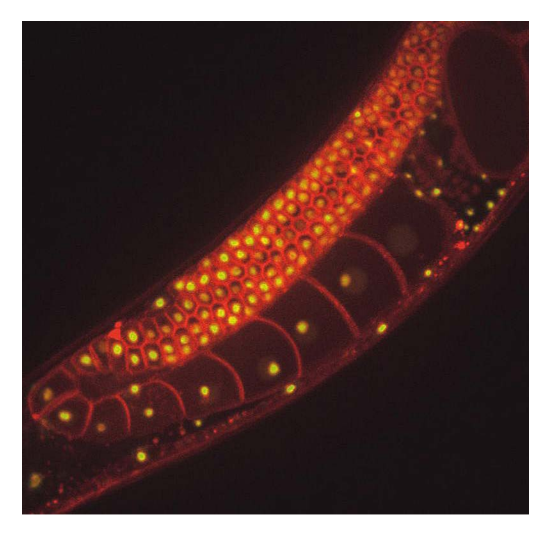


EL NUCLEOLO, la estructura más grande dentro del núcleo, es un condensado con organización interna. En estos nucleolos teñidos de células de rana se observan condensados de diferentes proteínas anidados unos dentro de otros.

Aunque ella y Brangwynne demostraran que la transcripción activa se produce en un condensado grande (en el nucleolo), otros condensados nucleares hacen lo contrario. Hay grandes porciones del ADN nuclear que, al ser más compactas y no expresar proteínas, se clasifican como heterocromatina. En 2017, Karpen, Amy Strom (investigadora posdoctoral en el laboratorio de Brangwynne) y sus colaboradores demostraron que en los embriones de *Drosophila* existía una proteína que experimentaba la separación de fases y formaba microgotas sobre la heterocromatina. Estas se fusionan luego entre sí, lo que posiblemente proporcione un mecanismo de compactación de la heterocromatina en el núcleo.

Los resultados también aportarían una explicación apasionante para un antiguo misterio. Hace años, los genetistas descubrieron que, si tomaban un gen que se expresaba activamente y lo colocaban justo al lado de la heterocromatina, el gen se silenciaba, como si el estado de la heterocromatina se hubiera contagiado. «Ese fenómeno de contagio se había observado desde el principio, pero nadie lo acababa de entender», señala Karpen.

Más tarde, los investigadores descubrieron unas enzimas implicadas en la regulación epigenética, denominadas metiltransferasas, y propusieron que avanzaban de una histona a otra por la cadena de ADN, desde la heterocromatina hacia la eucromatina adyacente, en una especie de «mecanismo enzimático progresivo», en palabras de Karpen.



LOS NUCLEOLOS aparecen como puntos amarillos en la tinción de los tejidos de un nematodo. Cada célula, independientemente de su tamaño, contiene solo uno. Las últimas investigaciones demuestran que el tamaño de los nucleolos depende de la concentración de las proteínas nucleolares.

Tal ha sido el modelo dominante durante los últimos veinte años para explicar el efecto contagioso de la heterocromatina. Pero Karpen piensa que los condensados que se fijan a la heterocromatina como las cuentas de un collar podrían deberse a un mecanismo diferente que explicaría la propagación del estado silencioso de la heterocromatina. «Es una manera diferente de pensar acerca de cómo funciona la biología», apunta. En la actualidad está concentrado en comprobar la hipótesis.

LA FORMACIÓN DE FILAMENTOS

Los condensados también ayudaron a solucionar otro misterio celular, que en este caso no afectaba al núcleo, sino a la membrana. Cuando un ligando (molécula que al unirse a otra desencadena en ella una acción) se fija a una proteína receptora de la superficie celular, se inicia una cascada de cambios y movimientos moleculares que transportan la señal por el citoplasma. Pero para que ello ocurra, hay que reunir primero a todos los participantes de este mecanismo, que se hallan dispersos por la célula. Lindsay Case, antigua colaboradora de Rosen y que acaba de montar su laboratorio en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, nos explica que hoy se piensa que la separación de fases podría ser el truco que usan las células para agrupar las moléculas de señalización necesarias cerca del receptor de la membrana.

Case señala que las modificaciones moleculares implicadas en la transmisión de las señales, como la adición de grupos fosforilo, afectan a la valencia de la proteína, es decir, a su capacidad de interaccionar con otras moléculas. Por tanto, las modificaciones también influyen en la propensión de las proteínas a formar condensados. «Si reflexionamos sobre lo que hace una célula, veremos que sobre todo regula la valencia», añade.

Los condensados también desempeñarían una función importante en la regulación y organización de la polimerización en filamentos proteicos largos. «La polimerización se favorece porque el condensado mantiene juntos los monómeros durante mucho más tiempo que si estuvieran fuera de él», indica Case. En su investigación posdoctoral descubrió que los condensados refuerzan la polimerización de la actina (una proteína del esqueleto celular) en filamentos que ayudan a que las células renales especializadas mantengan su extraordinaria forma.

MARINA FERIC Y CLIFFORD BRANGWYNNE (*nucleolos de rana*); STEPHANIE WEBER (*nucleolos de nematodo*)

La polimerización de otra proteína del citoesqueleto, la tubulina, es decisiva para que esta se ensamble en microtúbulos, estructuras filamentosas que forman el huso mitótico durante la división celular. En sus estudios de posgrado en el Laboratorio de Biología Molecular de la Universidad de Cambridge, en la década de 1980, Hyman quiso conocer cómo se formaba el huso en los embriones unicelulares de *C. elegans* antes de que se dividieran en dos células. En la actualidad está explorando la importancia que tienen los condensados en este proceso.

En un experimento in vitro, Hyman y su equipo crearon microgotas de la proteína tau y a continuación les añadieron tubulina, que se introducía en ellas. Observaron que los monómeros de tubulina se concentraban en las microgotas y se ensamblaban en preciosos microtúbulos. Hyman y sus colaboradores han propuesto que las células utilizarían la separación de fases, y la consiguiente formación de microgotas de tau, como método general para iniciar la polimerización de los microtúbulos y el desarrollo del huso mitótico.

La proteína tau es conocida también por generar los agregados típicos de la enfermedad de Alzheimer. De hecho, numerosas afecciones neurodegenerativas, como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) y la enfermedad de Parkinson, se caracterizan por los agregados proteicos anómalos que se acumulan en las células.

Para averiguar cómo se originan estos agregados, Hyman y sus colaboradores se centraron en una proteína denominada FUS, que presenta formas mutantes asociadas a la ELA. Dicha proteína suele hallarse en el núcleo, pero, en situaciones extremas, lo abandona y se traslada al citoplasma, donde forma microgotas. Los investigadores descubrieron que cuando fabricaban in vitro microgotas de proteínas FUS mutadas, estas se solidificaban en tan solo ocho horas en lo que Hyman denomina «agregados espantosos». Las proteínas mutantes favorecieron la transición de fase de líquido a sólido con mucha más rapidez que la forma normal de FUS.

Quizá la cuestión no sea por qué se forman los agregados en una enfermedad, sino por qué no lo hacen en las células sanas. En su charla de la reunión de biología celular, Hyman comentó que «una de las preguntas que planteo en las reuniones del laboratorio es por qué la célula no se parece a unos huevos revueltos», ya que las proteínas del citoplasma están «tan concentradas que deberían coagularse».

La primera pista surgió cuando el equipo de Hyman añadió ATP (el combustible celular) a los condensados que purificaron a partir de gránulos proteicos asociados al estrés y observó que los condensados desaparecían. Para estudiarlo mejor, pusieron clara de huevo en los tubos de ensayo, les añadieron ATP a unos y sal a otros, y luego los calentaron. Mientras que la clara con sal se agregaba, la que llevaba ATP no. Así pues, el ATP impedía que las proteínas se agregaran a la concentración que presentan en las células vivas.

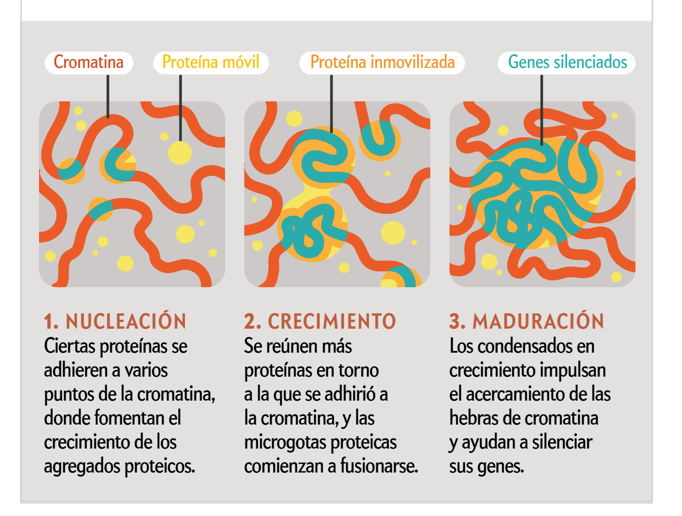
¿Cómo era posible? La respuesta no llegó hasta que, por casualidad, Hyman conoció a un químico en un seminario que impartió en Bangalore. El químico mencionó que, en los procesos industriales, los aditivos de tipo hidrótropo se utilizan para incrementar la solubilidad de las moléculas hidrófobas. Al regresar al laboratorio, Hyman y sus colaboradores descubrieron que el ATP era un hidrótropo fantástico.

Lo enigmático era que en las células había muchísimo ATP, a una concentración típica de entre 3 y 5 milimolar (mM). La mayoría de las enzimas que lo utilizan funcionan a una concentración tres órdenes de magnitud más baja (micromolar).

REGULACIÓN GENÉTICA

Condensados silenciadores

Las pruebas recientes indican que los condensados ayudan a empaquetar densamente parte de la cromatina (material cromosómico) en cada núcleo para limitar la expresión de los genes que esta contiene.



Entonces, ¿por qué el ATP está tan concentrado en las células si no se dedica a favorecer las reacciones metabólicas?

La propuesta de Hyman es que el ATP deja de actuar a modo de hidrótropo por debajo de entre 3 y 5 mM. «En el origen de la vida, el ATP debió de seleccionarse como hidrótropo biológico para mantener las biomoléculas solubles a una concentración elevada, y más tarde se seleccionaría como fuente de energía», sostiene.

Hyman admite que esta hipótesis resulta difícil de comprobar con experimentos, porque sería todo un logro manipular las propiedades hidrótropas del ATP sin afectar también a su función energética. Pero si la idea es correcta, explicaría por qué los agregados proteicos suelen formarse en las enfermedades relacionadas con el envejecimiento, cuando la síntesis de ATP va perdiendo eficacia.

OTROS COMETIDOS DE LAS MICROGOTAS

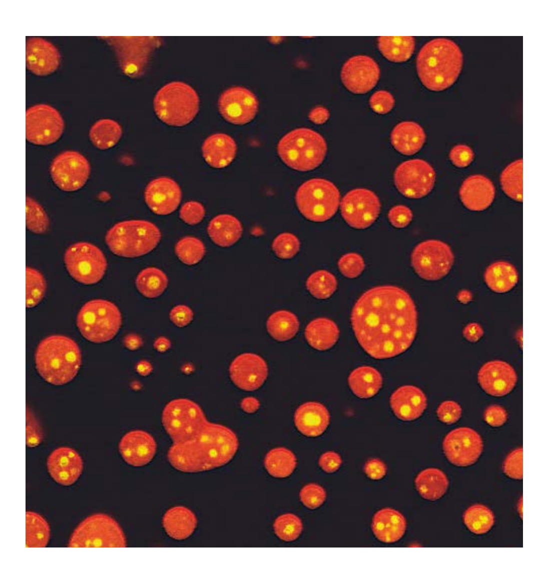
Los agregados proteicos son claramente dañinos en las enfermedades neurodegenerativas. Pero la transición de fase de líquido a sólido es adaptable en otras circunstancias.

Fijémonos en los ovocitos primarios de los ovarios, que permanecen latentes durante décadas antes de madurar y convertirse en un óvulo. Cada una de estas células contiene un cuerpo de Balbiani, que consiste en un gran condensado de la proteína amiloide y que está presente en numerosos organismos (desde las arañas hasta los humanos). Se cree que el cuerpo de Balbiani protege las mitocondrias durante la fase latente de los ovocitos al agruparlas entre sí mediante largas fibras de la proteína amiloide. Según Elvan Böke, bióloga celular y del desarrollo del Centro de Regulación Genómica, en Barcelona, cuando el ovocito comienza a madurar para convertirse en un óvulo, las fibras amiloideas se disuelven y el cuerpo de Balbiani desaparece. Böke estudia el ensamblaje y la disolución de dichas fibras, lo que podría conducir a

SAMUEL VELASCO/QUANTA MAGAZINE; FUENTE: «PHASE SEPARATION DRIVES HETEROCHROMATIN DOMAIN FORMATION», POR AMY R. STROM ET AL. EN *NATURE*, VOL. 547, PÁGS. 241-245, 2017

nuevas estrategias de tratamiento de la infertilidad o de las enfermedades neurodegenerativas.

Los agregados proteicos también solucionan problemas que requieren respuestas fisiológicas rapidísimas, como detener la pérdida de protoplasma (todo el interior de la célula) tras una lesión. Por ejemplo, el hongo *Mucor circinelloides* forma redes de hifas interconectadas y presurizadas, similares a una raíz, por las que fluyen los nutrientes. Greg Jedd, biólogo celular de la Universidad Nacional de Singapur, y sus colaboradores descubrieron hace poco que cuando lesionaban la punta de una hifa de este hongo, manaba por ella el protoplasma, pero casi en el mismo instante se formaba un tapón gelatinoso que detenía la efusión.



DOS TIPOS DE PROTEÍNAS (*rojo y amarillo*) aisladas de los nucleolos de huevos de rana se organizan espontáneamente en microgotas de condensados. Si se altera la concentración de cada proteína en la solución, se hará crecer o desaparecer uno o los dos tipos de condensados.

Jedd sospechó que en esta respuesta intervenía un polímero largo, probablemente una proteína con una estructura repetitiva. Los investigadores identificaron dos moléculas candidatas y hallaron que, sin ellas, la efusión resultaba catastrófica para el hongo, porque acababa convertido en un charco de protoplasma.

A continuación estudiaron la estructura de las dos proteínas, que denominaron gelina A y gelina B. Contenían diez dominios repetitivos, algunos de ellos con aminoácidos hidrófobos que podrían fijarse a la membrana celular. También perdían su plegamiento cuando se veían sometidas a fuerzas parecidas a las que experimentarían cuando el protoplasma mana por una lesión. Según Jedd, «la enorme aceleración del flujo nos hizo pensar que quizá fuera el desencadenante que le indica a la gelina que cambie de estado». Y así se solidifica de manera irreversible el tapón, que empieza a formarse por una señal física que induce la transición de la gelina desde la fase líquida a la sólida.

En cambio, las hifas de especies del hongo *Neurospora* se dividen en compartimentos, con poros que regulan el tránsito de agua y nutrientes. Jedd quería saber cómo se abrían y cerraban estos poros. «Descubrimos que algunas proteínas dúctiles parecían condensarse para agregarse en el poro y servir de mecanismo de taponamiento.»

El equipo de Jedd vio que las proteínas de *Neurospora* que eran candidatas para esta función tenían dominios de carga mixta repetidos, los cuales también se hallaron en algunas proteínas de mamíferos. Cuando los investigadores sintetizaron proteínas con diferente composición, pero con la misma longitud y distribución de las cargas, y las introdujeron en las células de mamífero, descubrieron que podían incorporarse en unos gránulos nucleares. Estos no eran más que condensados que se forman para regular la expresión génica en las células de los mamíferos, tal y como ellos y otros científicos de la Universidad de Washington en St. Louis describieron en un artículo de *Molecular Cell* en 2020.

Para Jedd, el reino de los hongos y el de los mamíferos parecen haber llegado de manera independiente a una estrategia que utiliza secuencias dúctiles en los mecanismos que dependen de la condensación, «pero las usan por motivos completamente diferentes y en compartimentos distintos».

RESOLVER ANTIGUOS ENIGMAS

La separación de fases se ha vuelto ubicua y está suscitando montones de ideas acerca de la intervención de este fenómeno en las diferentes funciones celulares. Según Karpen, «[la separación de fases] inspira un sinfín de posibilidades fascinantes, que es lo que creo que despierta el interés por este campo». Pero también nos advierte de que, aunque sea relativamente fácil demostrar que una molécula está sometida a la separación de fases en un tubo de ensayo, demostrarlo en la célula es mucho más complicado. «Todavía nos faltan muchos conocimientos», comenta.

Brangwynne concuerda con él. «Para ser sincero, en este campo todavía estamos todos en una fase muy elucubradora. Es demasiado pronto para entender su funcionamiento. El hecho de que se cavile sobre ello no significa que la separación de fases líquidas no sea la fuerza motriz. De hecho, creo que lo es, pero no sabemos cómo funciona realmente.»

Las incertidumbres tampoco desalientan a Hyman. «La separación de fases nos invita a dar un paso atrás para contemplar antiguos problemas que se quedaron encallados y a plantearnos si podríamos abordarlos hoy de otra forma. Todos los avances logrados en biología estructural han sido brillantes, pero muchas incógnitas quedaron sin resolver porque no se conseguía explicar lo que sucedía. La separación de fases sí lo permite y ha llegado para que nos pongamos a pensar de nuevo en dichas cuestiones.» IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Germline P granules are liquid droplets that localize by controlled dissolution/condensation. Clifford P. Brangwynne et al. en *Science*, vol. 324, págs. 1729-1732, junio de 2009.
Biomolecular condensates: Organizers of cellular biochemistry. Salman F. Banani et al. en *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 18, págs. 285-298, febrero de 2017.
Phase separation drives heterochromatin domain formation. Amy R. Strom et al. en *Nature*, vol. 547, págs. 241-245, junio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El caos ordenado de las proteínas. A. Keith Dunker y Richard W. Kriwacki en *IyC*, junio de 2011.
Fricción interna y plegamiento. Benjamin Schuler y Jane Clarke en *IyC*, octubre de 2014.

MARINA FERIC Y CLIFFORD BRANGWYNNE

por Alejandro Arenas Moreno



Alejandro Arenas Moreno investiga en el Departamento de Ingeniería Informática y Matemáticas de la Universidad Rovira i Virgili, en Tarragona. Es especialista en física de sistemas complejos y experto en evolución espaciotemporal de epidemias.

Matemáticas contra el coronavirus

Los modelos complejos pueden ayudarnos tanto como la medicina en esta pandemia

Hace más de un año se declaraba la pandemia de COVID-19, que se convertiría en la peor desde hace un siglo. Hemos vivido una de esas catástrofes humanitarias que pasarán a los libros de historia. La enfermedad se ha cobrado más de 2,8 millones de vidas y ha contagiado a más de 133 millones de personas en todo el mundo. Este coste humanitario es solo la punta del iceberg, ya que todavía no se han cuantificado con precisión muchos de los efectos de la COVID-19: las defunciones producidas por el colapso sanitario, las secuelas persistentes de la enfermedad, sus efectos psicológicos graves, el alcance de la destrucción económica o el aumento de las desigualdades sociales.

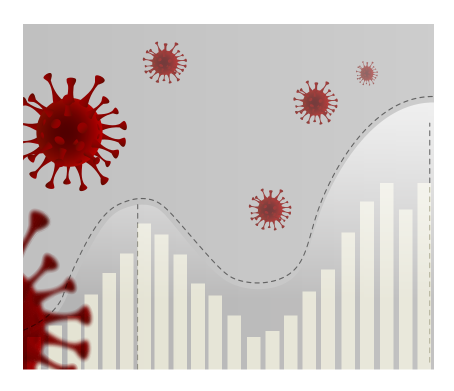
Sin embargo, no todas las regiones del mundo han sufrido el golpe de la misma manera. Varios países asiáticos han reducido el impacto de una manera espectacular. ¿Cómo lo han conseguido? La respuesta es sencilla: han entendido y previsto con rapidez la evolución de la epidemia y sus consecuencias. Veamos ahora qué errores hemos cometido los países occidentales e intentemos aprender de ellos.

Ante todo, hay que tener presente que la epidemiología es una ciencia extraordinariamente compleja que exige un esfuerzo muy importante en matemáticas, estadística y análisis de datos, y otro menos importante en medicina. Para que nos entendamos, si hacemos el símil con una guerra, la epidemiología es pura estrategia, mientras que la medicina, y en particular la bioquímica, son los fabricantes de armas y munición. En nuestro país, como en muchos otros, se ha pensado que la pandemia era un problema médico, cuando en realidad es un problema, principalmente, estratégico.

La epidemiología computacional no ha sido un campo prolífico de la investigación médica en España, pero sí lo ha sido de la investigación física y matemática. Este enfoque matemático no estaba al alcance de nuestros médicos, pero sí de nuestros investigadores de sistemas complejos.

Otro error ha sido pensar que la epidemiología equivale al mero análisis de los datos, con el cálculo de tendencias, medias y otros indicadores. Aunque dicho análisis resulte fundamental, intentar controlar una epidemia con él es como intentar predecir la bolsa: puede funcionar a muy corto plazo, pero poco más.

La epidemiología requiere el empleo de modelos matemáticos. Un modelo epidemiológico es, básicamente, un sistema de ecuaciones diferenciales que recoge los elementos fundamentales de transmisión y contagio del virus. La epidemiología ha avanzado mucho en los últimos años, y los modelos actuales incorporan en sus ecuaciones redes complejas de interacción, datos sobre la movilidad de los individuos, datos reales sobre la evolución epidémica y funciones de distribución de las variables biológicas del virus, de los humanos e incluso de los factores ambientales.



GETTY IMAGES/JIRA PLIANKHAROM/ISTOCK

Estos modelos, que los físicos denominamos mecanicistas, constituyen el instrumento esencial de la epidemiología, ya que permiten explorar escenarios de futuro y su incertidumbre. Con ellos podemos examinar, en el espacio y el tiempo, la evolución de la epidemia según la movilidad de las personas, la afectación por intervalos de edad y los efectos de las medidas profilácticas (como el uso de mascarillas), de la vacunación, de las pruebas diagnósticas e incluso de los fármacos paliativos. Los resultados de los modelos nos ayudan a predecir la incidencia de las infecciones, las hospitalizaciones, la ocupación de las UCI y las defunciones. Su papel debería ser crucial a la hora de establecer la mejor estrategia contra el virus. De hecho, casi desde el principio de la pandemia ya nos indicaban que la mejor respuesta era la supresión, la adoptada por los países asiáticos. Se basa en reducir la incidencia de las infecciones a valores muy bajos, casi nulos, de forma que más tarde su control sea factible mediante el seguimiento individual de los casos.

En cambio, el mundo occidental ha adoptado la estrategia de la mitigación. Se ha reducido la transmisión hasta valores que evitaran el colapso de las UCI, el auténtico cuello de botella del sistema sanitario. Pero los modelos indican que, con las condiciones particulares de esta pandemia (la propagación de la infección por aerosoles, su elevada transmisibilidad y nuestra gran movilidad geográfica), la estrategia de la mitigación da como resultado una situación prolongada de olas epidémicas sucesivas controlada sobre todo por las restricciones periódicas de la interacción social. Las consecuencias de esta estrategia, como se ha visto, son nefastas: cada nueva ola acarrea un extraordinario estrés sanitario, un horizonte económico de aperturas y cierres totalmente caótico y una mortalidad inasumible.

La estrategia de supresión exige un esfuerzo mental y unas restricciones muy estrictas que Occidente no ha sido capaz de asumir. Cuando la contención consigue que la incidencia caiga, el sistema sanitario se descongestione y todo parece ir bien, es justo cuando hay que seguir esforzándose para alcanzar valores de incidencia casi nulos. Pero las prisas por reactivar la economía, recuperar la normalidad en nuestra vida y alzarnos en victoria tienen el efecto contrario y nos están sacrificando social y económicamente. Reconocer estos errores puede ayudarnos en las futuras decisiones.

por Jaime Martínez Valderrama



Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.

Aceite para hoy, sequía para mañana

El monocultivo superintensivo de olivos está vaciando los acuíferos de una reserva protegida y acelerando la desertificación

A medida que bajamos hacia el sur de España por la A7, encontramos un paisaje cada vez más árido y rácano. Ya en la provincia de Almería, la autovía salva un par de quebradas que captan nuestra atención: el barranco del Tesoro y el del río Aguas. Si las remontamos, llegamos a una especie de oasis donde la vegetación solía ser espléndida y la fauna sorprendente. Su origen es un manantial por el que descarga el acuífero Alto Aguas, que ocupa una parte del valle de Tabernas. El flujo de sus aguas y las lluvias han ido excavando, a lo largo de miles de años, galerías y cavidades. El conjunto es tan singular que se creó una reserva, el Karst en Yesos de Sorbas. Incluye 17 tipos de hábitats y 27 especies de aves protegidas por directivas europeas, y da cobijo a la emblemática tortuga mora.

Durante siglos, este lugar mantuvo una agricultura modesta pero variada. Ahora, en cambio, está agotado. En cuatro decenios, el caudal del río ha pasado de 70 a 7 litros por segundo. ¿Qué ha ocurrido? Nos encontramos ante un claro caso de desertificación. El calentamiento global y el consiguiente aumento de sequías explica una parte del problema. Pero, tal y como hemos explicado en *Land*, la razón principal del deterioro de esta zona es otra y la hallamos en el extremo oriental del valle.

Siguiendo una carretera estrecha y sinuosa, nos sorprende un tapiz verde que inunda el terreno: miles de olivos, dispuestos en apretadas filas, se pierden en el horizonte. Entre los arbustos apenas hay metro y medio, y las filas están separadas 3 o 4 metros (*fotografía*). Este cultivo superintensivo presume de ser extremadamente eficiente. Y, de hecho, lo es.

Sin embargo, las repercusiones de esa eficiencia no son todas positivas. El volumen de extracciones supera con creces a la recarga natural del acuífero, por lo que el negocio está condenado a la extinción. Pese a los informes que advierten, desde hace años, de este uso insostenible, la descoordinación entre las administraciones hace que se sigan autorizando volúmenes de riego incompatibles con el régimen hidrológico de la zona.

Tradicionalmente, el olivo era un cultivo de secano. En Tabernas podíamos encontrarlo siguiendo las líneas de acumulación de escorrentía, al fondo de pequeñas depresiones o barrancos, o delimitando bancales. Los olivos, dispersos, tenían densidades de entre 65 y 100 pies por hectárea (pies/ha), y el aceite que daban era de una calidad extraordinaria. Ello le valió varios premios y el sobrenombre de «oro del desierto».



CORTESÍA DEL CLUB ALMERIENSE DE MONTAÑISMO

Aprovechando la fama y el acceso a las aguas subterráneas, los olivos comenzaron a regarse y apretarse (210 pies/ha), con el fin de aumentar la producción. De 200 hectáreas en regadío en los años cincuenta, pasamos a 2000 a finales de siglo. El aumento de superficie continuó, acompañado de una nueva intensificación del regadío en forma de olivares en seto superintensivos. La densidad de plantación supera ya los 1500 pies/ha.

Si nos quedamos con la visión meramente productivista, no hay duda de que este es el camino: en secano se obtienen 0,7 toneladas por hectárea, con riego tradicional 2 y con cultivo superintensivo en zonas cálidas con un buen riego... ¡16! Pero este camino tiene contrapartidas poco deseables. La más importante es que el acuífero que sostiene todo el agronegocio se está agotando, probablemente de manera irreversible. A mayor rendimiento, mayor necesidad de agua: el secano vive de la lluvia, el regadío menos intenso requiere unos 3000 metros cúbicos por hectárea y el superintensivo bebe más de 5000. Por otra parte, la calidad del aceite está lejos de la del mencionado «oro del desierto». Además, la nivelación del terreno y la eliminación de la cubierta vegetal entre los olivos han deteriorado el suelo, con un aumento de la erosión, y han perjudicado la biodiversidad. Para finalizar, las ganancias de este tipo de agricultura se concentran en unos pocos productores, mientras que las pérdidas (sobre todo las derivadas de quedarse sin agua) perjudican a toda la población.

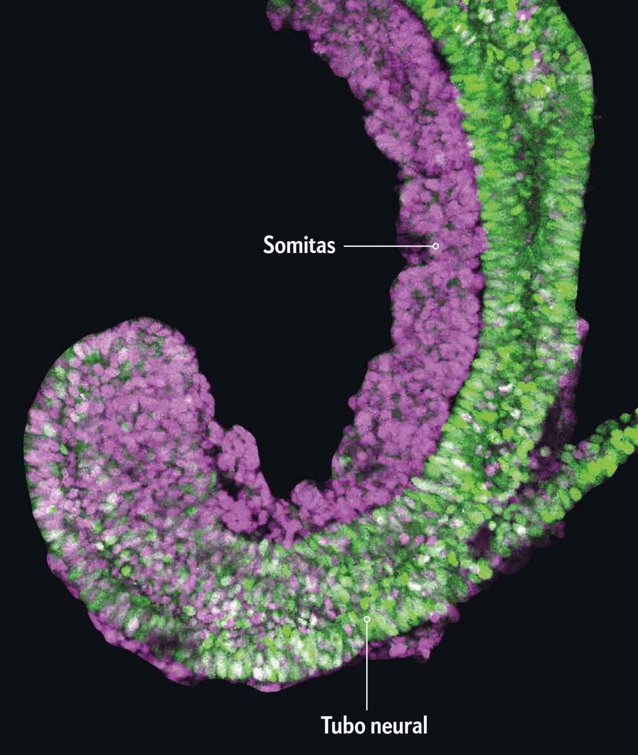
En 2019, la superficie de olivar en regadío era de 4300 hectáreas, 1550 de las cuales en régimen superintensivo. En el momento de escribir estas líneas, las cifras han sido superadas. No se trata de contraponer este modelo agrario frente a otro más tradicional. Se trata de ser conscientes de que apostar solo por la cantidad, en un contexto de escasez hídrica, de calentamiento global, de excedente de aceite de oliva y, por tanto, de caída de precios, no tiene sentido. Conociendo el delicado estado de este acuífero, urge limitar su explotación y promulgar una agricultura más integrada en el paisaje y que apueste por la calidad. Existen iniciativas más sensatas, como el proyecto Olivares Vivos, financiado por la Comisión Europea, que integran la explotación del territorio con el mantenimiento de la funcionalidad de los ecosistemas. Algo que, a su vez, redunda en la salud económica de la zona. IyC

La redacción

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Embriones en una placa de Petri

Una nueva técnica permite observar el desarrollo de varias estructuras orgánicas en el embrión



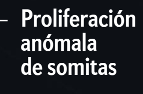
Para observar los primeros procesos que dan forma a un animal en desarrollo, Jesse Veenvliet y su equipo, del Instituto Max Planck de Genética Molecular, en Berlín, cultivaron partes de embriones de ratón en placas de Petri. Para ello, incluyeron células madre de ratón en un medio de cultivo similar a un gel con propiedades análogas a las de la llamada matriz extracelular (una sustancia gelatinosa, formada principalmente por proteínas estructurales y glúcidos, que separa entre sí las células de los tejidos corporales). Este medio nutritivo y consistente les sirvió de soporte y guía a las células madre, y les permitió desarrollarse durante un período de hasta cinco días, del mismo modo a como sucede durante el crecimiento natural del embrión en la mucosa uterina.

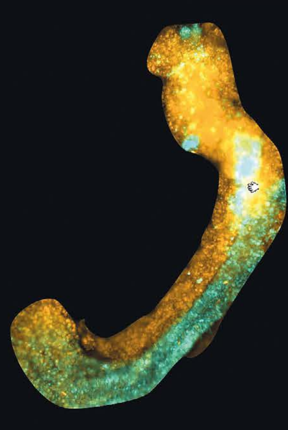
La imagen muestra estructuras de embrión en diferentes etapas de desarrollo teñidas con distintos marcadores fluorescentes (*diferentes colores*). Puede observarse, por un lado, cómo se extiende gradualmente un tubo neural del que más tarde surge la médula espinal y, por otro, cómo crecen los «somitas», segmentos primordiales que dan lugar a partes del esqueleto, los cartílagos y los músculos. También aparecen estructuras precursoras de órganos internos, como el intestino. Algunas partes han sufrido un desarrollo anómalo como consecuencia del tratamiento químico y han generado un número excesivo de segmentos primordiales, que se disponen como uvas.

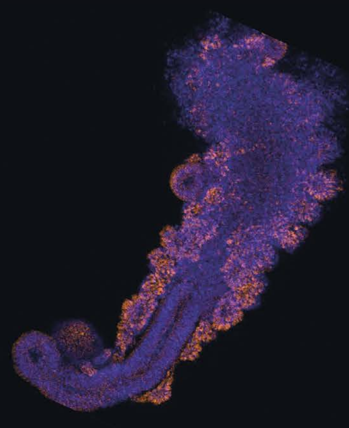
Estos procesos suelen ser difíciles de observar en los mamíferos. Ello se debe a que sus embriones apenas resultan accesibles una vez que se han implantado en el útero. Este nuevo método permite seguir el desarrollo embrionario temprano en un cultivo celular e investigar las señales bioquímicas y genéticas que lo controlan.

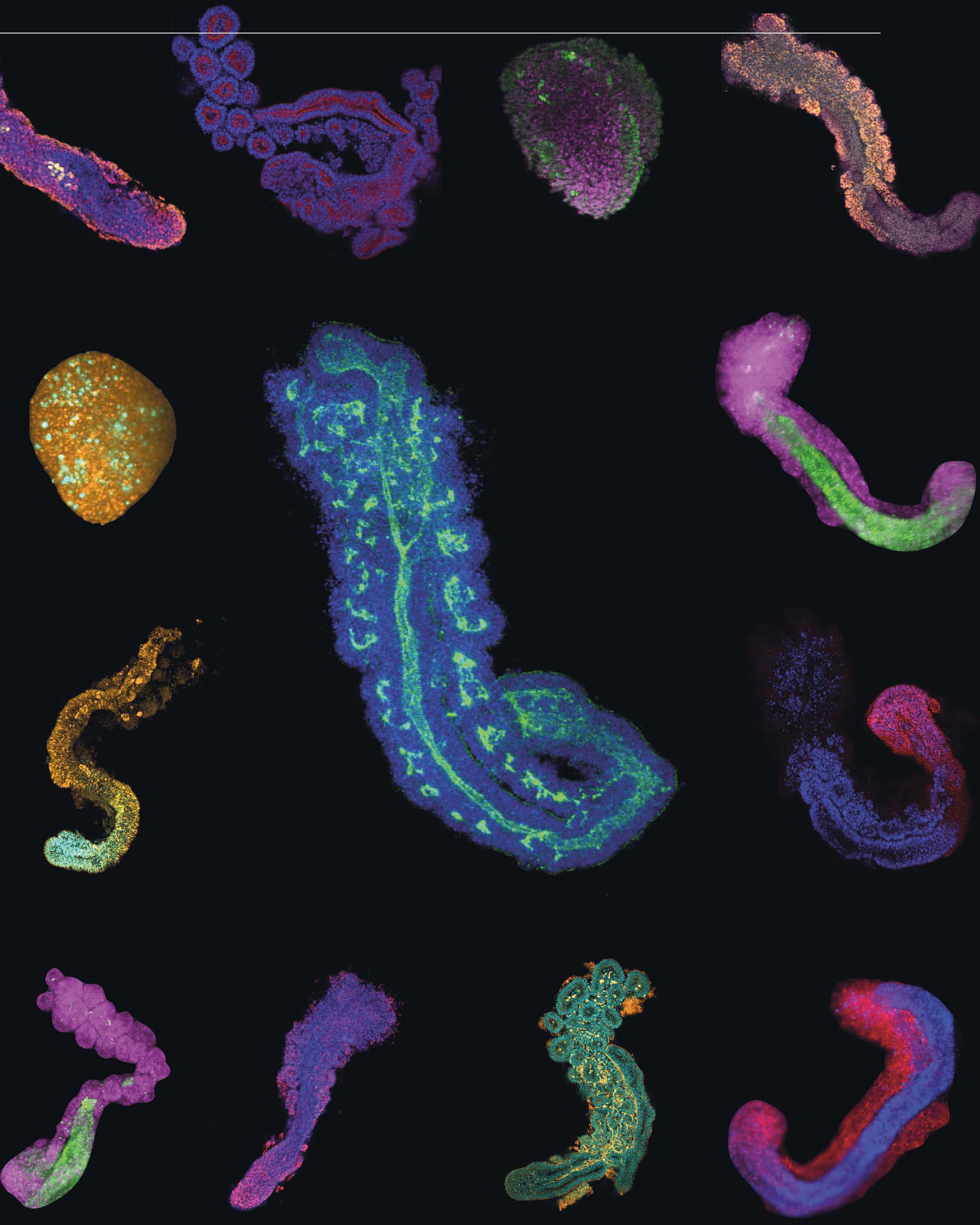
—La redacción

«MOUSE EMBRYONIC STEM CELLS SELF-ORGANIZE INTO TRUNK-LIKE STRUCTURES WITH NEURAL TUBE AND SOMITES», POR JESSE V. VEENVLIET ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 370, EABA4937, 2020.









por José Luis Tellería



José Luis Tellería es catedrático de zoología en la Universidad Complutense de Madrid. Investiga en el Departamento de Biodiversidad, Ecología y Evolución.

Félix de Azara y la conservación de la naturaleza en América

A finales del siglo xviii, el militar naturalista describió el impacto de la destrucción del hábitat, la sobrecaza y la llegada de especies exóticas en la biodiversidad de la América colonial

Este año celebramos el bicentenario de la muerte de Félix de Azara (1746-1821), sin duda el primer ornitólogo moderno español y uno de los primeros naturalistas interesados en la conservación de la naturaleza americana. En un contexto de preocupación por la crisis de biodiversidad que amenaza la sostenibilidad del planeta, resaltamos en estas páginas la importancia de su labor por ser un claro testimonio del deterioro que ha sufrido el patrimonio natural americano.

Ingeniero militar, en 1781 fue enviado al Virreinato del Río de la Plata para acordar las fronteras coloniales entre España y Portugal. Bloqueado en Asunción (Paraguay) por el retraso de los cartógrafos lusos, decidió «hacer una buena carta o mapa, sin omitir lo que pudiera ilustrar la geografía física, la historia natural de las aves y cuadrúpedos». Iniciaba así un período de doce años (1784-1796) de viajes y peripecias por un territorio de frontera. En ese tiempo, escribió sus famosos apuntamientos sobre las aves y mamíferos de Paraguay. De hecho, ha pasado a la historia por descubrir y describir numerosas especies de aves y mamíferos, y por desarrollar algunas hipótesis en línea con la futura teoría evolutiva de Darwin.

Aunque su obra ha sido analiza por numerosos historiadores, no se ha agotado el caudal de ideas que fluyen de sus escritos. Un aspecto apenas estudiado es su crónica del daño producido en aquella época a la biodiversidad de los bosques y herbazales de aquellos inmensos territorios. Los que hemos leído *Imperialismo ecológico* de Alfred W. Crosby (2004) sabemos que el avance de la frontera agrícola europea en aquella tierra produjo una revolución ambiental tan drástica como la transformación cultural de los indígenas que las ocupaban. Los escritos de Azara constituyen, desde esta perspectiva, un acta del impacto humano sobre la naturaleza de Paraguay, Argentina y Uruguay al final del período colonial.



FÉLIX DE AZARA retratado por Goya en 1805. Aparece en un gabinete de estudio, con unos estantes llenos de aves coloristas y cuadrúpedos disecados. Sobre la mesa, el bicornio y tres libros que hacen referencia a las publicaciones de sus estudios científicos.

RETRATO DE FÉLIX DE AZARA, FRANCISCO DE GOYA Y LUCIENTES, 1805. MUSEO GOYA. COLECCIÓN IBERCAJA, ZARAGOZA

La conservación de la naturaleza en el siglo xviii

Los ilustrados del siglo xviii estaban decididos a domeñar el mundo que les rodeaba apoyados en la racionalidad y el conocimiento. Gaspar Melchor de Jovellanos, influyente intelectual de la época, ensalzaba la intervención humana sobre la naturaleza en su *Informe sobre la Ley Agraria* (1795): «Sin duda que a ella debe la naturaleza grandes mejoras. A doquiera que se vuelva la vista, se ve hermoseada y perfeccionada por la mano del hombre. Por todas partes descuajados los bosques, ahuyentadas las fieras, secos los lagos, acanalados los ríos, refrenados los mares, cultivada toda la superficie de la tierra, y llena de alquerías y aldeas, y de bellas y magníficas poblaciones...». Un discurso preocupante para los conservacionistas actuales y que sigue muy vigente entre los que hoy promueven el avance a sangre y fuego de la frontera agrícola en Sudamérica.

Así que el ilustrado Azara desempeñó su trabajo en un contexto puramente utilitarista. De hecho, en sus escritos no deslizó ninguna alusión a la posibilidad de compatibilizar el desarrollo con la protección de aquel mundo que veía desaparecer. Pero, si bien Azara no fue un conservacionista de corte actual, hay que reconocer

que se ocupó y preocupó de ese deterioro ambiental, algo poco habitual en los naturalistas y viajeros de aquella época. Y, sobre todo, ilustró certeramente el papel destructivo del popular «cuarteto del diablo» con el que el geógrafo Jared M. Diamond se referiría años más tarde a los procesos implicados en la desaparición de la biodiversidad.

Pérdida de hábitat y sobreexplotación

Azara se fijó en dos formas de destrucción del hábitat que todavía hoy siguen vigentes en América del Sur. En su diario describió el deterioro del espinar, un bosque típico del norte de Argentina que fue transformado en pastizales y campos de maíz y soja: «De su disposición y de los raigones que retoñan se infiere con bastante fundamento que todos estos países han sido no ha mucho tiempo, un bosque continuo que las quemazones han destruido y en breve acabarán con lo que queda. Lo mismo se puede inferir desde mi salida de Buenos Aires. La calidad y disposición de los terrenos es la misma, y algunos indicios manifiestan que todo arguye la existencia del continuo bosque. Donde vive el hombre, ni árboles, ni plantas, ni animales quedan».

También abordó el problema de las quemas controladas, una técnica utilizada para despejar el monte y mejorar el pasto del ganado de consecuencias nefastas para muchos otros organismos: «Cuando las plantas se han hecho fuertes y duras se incendian para que retoñen de nuevo y proporcionen al ganado un pasto más tierno. Pero esta operación acaso disminuye el número de especies, porque las semillas se queman y es natural que el fuego haga perecer las plantas delicadas. Hacen falta precauciones para poner fuego a estas plantas, porque el viento propaga el incendio, que solo se detiene por los ríos o por los caminos. [...] Los bosques detienen sus estragos porque son tan cerrados y tan verdes que no arden; pero los bordes de estos bosques se secan y se tuestan, de modo que pueden inflamarse fácilmente por un nuevo incendio. Esto hace perecer una inmensa cantidad de insectos, reptiles y pequeños cuadrúpedos». Y, disgustado por el destrozo del bosque de las Misiones Guaraníes, señaló que solo se «hace uso de diez especies de madera; se desprecia y llama inútiles a todas las demás, y podrá suceder y sucederá infaliblemente que con el tiempo se hallen preciosas las maderas que hoy no se atienden».

Igualmente, Azara se refirió a la caza sin sentido de muchos animales. Anunció el triste destino de los torpes osos hormigueros: «desaparecerán del mundo luego que esto se pueble un poco más, porque estas gentes matan todos los que encuentran, sin utilidad, ni más motivo que la suma facilidad de hacerlo. No huyen: caminan espaciosamente casi besando el suelo; y aunque hostigados galopean, su mayor velocidad no es la mitad que la del hombre». Y de los ágiles ñandúes: «Como el Paraguay está más y más antiguamente poblado que el Río de la Plata, escasean allá los ñandús, que son más comunes en los campos de Montevideo y de Misiones, y en las pampas de Buenos Aires. [...] Desaparecerá del mundo luego que esto se pueble, pues aunque sea difícil pillarle con escopeta y a caballo, e imposible atraerle a las trampas, todo el mundo recoge los huevos que encuentra, y por consiguiente es muy difícil que se logren las crías donde haya población: a lo que se agrega que se matan muchos pollos las más veces sin la menor utilidad».

«Donde vive el hombre, ni árboles, ni plantas, ni animales quedan»

Especies introducidas e interacciones

Azara describió también el impacto de las vacas y caballos traídos por los europeos y sus interacciones con los pastizales rioplatenses. Calculaba que los ganaderos de aquel territorio estaban «ocupados en guardar doce millones de vacas y tres millones de caballos, con un considerable número de ovejas. [...] No comprendo en este número los dos millones de vacas salvajes o cimarronas que estimo que puede haber en el país, ni tampoco la innumerable cantidad de caballos salvajes que se encuentran». Aunque estas cifras pudieran ser exageradas según algunos historiadores, la llegada y expansión de este ganado inició la transformación ecológica de la región por su impacto directo y facilitó la entrada de nuevas especies invasoras.

Según relató Azara, «la vegetación de los campos sin bosques, padece alteración por el influjo del hombre y de los cuadrúpedos [mamíferos]; porque en las estancias o dehesas pobladas algunos años de ganados mayores y de pastores, se exterminan aquellos pastos altos y los pajonales, y nace la grama común y un abrojo achaparrado de hoja muy menuda. El ganado lanar abrevia el exterminio de toda planta elevada, y fomenta la grama. He observado mil veces, que en cualquier desierto donde el hombre se establezca, nacen al año alrededor de su choza, malvas, ortigas, abrojos comunes y otras varias plantas que no había visto a treinta leguas en contorno». Describía así la expansión de multitud de «malas hierbas» llevadas desde Europa que terminaron cubriendo grandes extensiones de aquellos herbazales.

Hay que admitir que, a finales del XVIII, las selvas de Misiones ocupaban todavía grandes extensiones, que la mayor parte de los herbazales de la Pampa y la Patagonia estaban aún inalterados y que sobrevivía en todo su esplendor el gran bosque del Chaco, un reservorio de biodiversidad hoy amenazado. Era muy pronto para evaluar las consecuencias globales de la pérdida de diversidad y, mucho menos, la necesidad de controlar ese destrozo. Pese a todo, Félix de Azara supo ver lo que ocurría y por ello, al cumplirse 200 años de su muerte, creo que es justo reivindicarlo como uno de los primeros naturalistas interesados en la conservación de la naturaleza americana. ■

PARA SABER MÁS

La tierra esquilmada: Las ideas sobre la conservación de la naturaleza en la cultura española del siglo XVIII. Luis Urteaga. Serbal, 1987.

Overview of recent extinctions. Jared M. Diamond en *Conservation for the twenty-first century*. Dirigido por D. W. Western y M. C. Pearl. Oxford University Press, 1989.

Ecological imperialism: The biological expansion of Europe, 900-1900. Alfred W. Crosby. Cambridge University Press, 2004.

Félix de Azara. Su vida y su época. Julio R. Contreras. Tomo 2: El despertar de un naturalista: la etapa paraguaya y rioplatense (1782-1801). Diputación Provincial de Huesca, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Historia y legado de Félix de Azara. José María López Piñero en *IyC*, octubre de 1981.



LOS ARQUEÓLOGOS llevan décadas estudiando el asentamiento prehistórico de Çatalhöyük, en Turquía.

ARQUEOLOGÍA

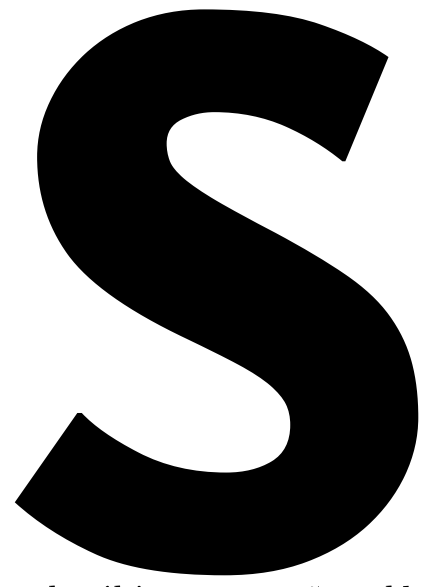
El origen del hogar

Una ciudad de 9000 años de antigüedad revela cómo era la vida cuando empezamos a echar raíces

Annalee Newitz



Annalee Newitz es escritora y periodista especializada en ciencia.



Situada en el centro de Anatolia, la llanura de Konya destaca por ser una extensa meseta elevada en la que abundan las granjas pequeñas y los campos polvorientos, rodeada por cordilleras que proyectan sombras de tonalidad purpúrea. De noche, el visitante puede conducir hasta las colinas y ver las lejanas luces de la ciudad homónima, que brillan como un espejismo. La vista que se contempla desde ese lugar no ha cambiado gran cosa durante los últimos 9000 años; el horizonte iluminado le resultaría familiar incluso a un caminante del año 7000 a.C. Y es así porque la llanura es una de las cunas de la vida urbana.

Miles de años antes de que surgieran las ciudades mesopotámicas más al sur, prosperó en ese lugar la protociudad de Çatalhöyük (pronunciada «Cha-tal-ju-yuk»). Con una superficie cercana a las 13 hectáreas y una población cifrada en torno a 8000 personas, era la metrópolis de la época. Estuvo habitada sin interrupción casi dos mil años, antes de ser abandonada paulatinamente a partir del año 5000 a.C. Durante su apogeo, las hogueras de las numerosas fiestas celebradas debieron ser visibles desde la lejanía sobre las praderas.

A diferencia de otras ciudades posteriores, Çatalhöyük no poseía grandes monumentos ni mercado. Imagínesela como una docena de aldeas agrícolas que crecieron hasta quedar agregadas y formar lo que algunos investigadores han calificado como un «megaasentamiento». Los habitantes accedían a través de puertas abiertas en el techo a los millares de casas de adobe, adosadas unas a otras, deambulaban por las aceras que rodeaban los tejados de la ciudad y cultivaban pequeñas parcelas en los terrenos circundantes. Ya fuera ocupados en la reparación de las viviendas, en tejer o en fabricar útiles, o en cocinar o crear arte, las gentes de Çatalhöyük pasaban gran parte del día entre cuatro paredes, junto a las mismas plataformas que les servían como lecho o, durante los meses cálidos, subidas a los tejados.

No era lo que los arqueólogos esperaban hallar cuando a inicios de la década de 1960 iniciaron las excavaciones en el lugar. Por lo que sabían entonces de otras ciudades antiguas, esperaban sacar a la luz santuarios, mercados y tesoros de valor incalculable. Nada más lejos de la realidad, pues desenterraron



PÁGINAS PRECEDENTES: JASON QUINLAN; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

EN SÍNTESIS

El arraigo y el concepto de hogar nacieron en el Neolítico, con la agricultura y la sedentarización que esta trajo consigo.

En Çatalhöyük, uno de los poblados permanentes más antiguos, han salido a la luz numerosos indicios de la vida doméstica y urbana en sus orígenes.

Los vestigios hallados dentro de las viviendas no solo indican que eran un lugar de reposo, sino también taller de trabajo y recinto de culto a los antepasados.

restos de paredes decoradas, utensilios de cocina y objetos rituales asociados sin excepción a la domesticidad, más que a un centro de culto formal. El gran contraste entre lo esperado y lo hallado dejó desconcertados durante décadas a quienes investigaron en Çatalhöyük. Hizo falta una nueva clase de arqueólogos para averiguar qué significado tenía todo aquello y reconstruir cómo era realmente la vida en el momento en que los primeros humanos abandonaron el nomadismo para vivir como agricultores y habitantes urbanos, con un gran arraigo a su hogar.

LA CASA DE DIDO

La arqueóloga Ruth Tringham, de la Universidad de California en Berkeley, viajó en el año 2000 hasta Çatalhöyük para visitar una casa donde no había entrado la luz del sol en milenios. En el interior descubrió los restos de una mujer enterrada bajo la plataforma que servía de lecho. Tringham le puso el nombre de Dido y regresó los veranos siguientes con un equipo para excavar en su casa. El grupo analizó con meticulosidad las figurillas de animales y los huesos depositados entre las numerosas capas de yeso que recubrían las paredes.

Lo que encontraron fue un hogar en el que todo se había hecho desde cero. A las personas de hoy nos resulta difícil imaginar el gran esfuerzo que exigía la vida cotidiana en una casa durante la época de Dido. Si querías cocinar algo para la cena tenías que cultivarlo y cosecharlo o darle caza, construir tu propio horno, fabricar los utensilios como los cuchillos de obsidiana o las ollas de arcilla y, al fin, ponerte a cocinar. La gente fabricaba sus propios ladrillos, construía su casa, tejía esteras para el suelo con juncos y confeccionaba la ropa con agujas, hilo y tejidos fabricados, cómo no, con sus manos.

Incluso la espiritualidad parecía manufacturada. Enterraban a sus seres queridos bajo el suelo, puede que para mantenerlos cerca, y decoraban reverentemente sus cráneos con yeso y pintura. Se han descubierto cráneos parecidos en otros yacimientos neolíticos, datados entre 12000 y 6500 a.C. en el Creciente Fértil, como en Jericó, Cisjordania. Al parecer, en aquella época era bastante habitual honrar a los difuntos recreando el rostro con yeso, aplicado sobre el cráneo. En ocasiones, los habitantes de Çatalhöyük intercambiaban los cráneos con otras familias y los volvían a enterrar en una época posterior. No es raro descubrir varios cráneos junto a un cuerpo, lo que indica que estos rituales conectaban a los familiares con su hogar durante varias generaciones.

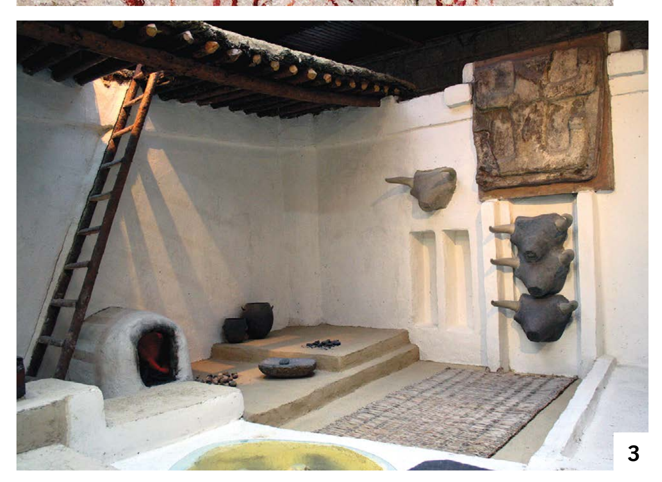
Los arqueólogos han desenterrado pinturas muy elaboradas en las paredes interiores de las casas, que se rehacían cada año con los mismos motivos, como si las sucesivas generaciones de moradores quisieran mantener intactas las pinturas originales. Algunos son motivos abstractos de remolinos o zigzags, como un equivalente antiguo del papel pintado. Otros evocan escenas de fauna y caza. Algunas pinturas murales incluso arrojarían algo de luz sobre los fundamentos espirituales del ritual de los cráneos: en una vivienda se descubrió una imagen que mostraba cuerpos decapitados rodeados de buitres; da la impresión de que las rapaces se estaban llevando el espíritu de los difuntos.

Otros adornos consistían en huesos de animales. Casi todas las casas tenían un bucráneo empotrado en la pared, un cráneo de toro enyesado y pintado de rojo intenso, cuyas astas señalaban hacia el interior de la estancia. De igual modo escondían garras y dientes de animales feroces entre los ladrillos de barro de las paredes, algo parecido a la costumbre, aún vigente en algunos lugares, de clavar una herradura en la fachada o en la puerta de casa.

El hallazgo de estos objetos indudablemente simbólicos, cuasi religiosos, mezclados con los desperdicios domésticos dejó desconcertados a los arqueólogos, allá por la década de 1960. James Melaart, uno de los primeros estudiosos, pensó que la ciudad entera debía ser un gigantesco y misterioso santuario. Pero «solo es un misterio si te esperas otra cosa, algo más grande y más complejo», señala Tringham. Melaart y sus colaboradores esperaban hallar ese tipo de objetos en grandes templos, no en las cocinas de las casas. Tringham siempre prefirió que las pruebas hablaran por sí mismas, sin ideas preconcebidas.


1


2


3

LA MAYORÍA DE LAS MORADAS DE ÇATALHÖYÜK estaban decoradas con huesos de animales, entre los que destacan los cráneos de toro o bucráneos (*1*). Las paredes estaban adornadas con pinturas elaboradas (*2*). Recreación de un hogar que muestra la presencia de objetos simbólicos y utensilios domésticos bajo el mismo techo (*3*).

JASON QUINLAN (*1, 2*); LAURA DI BIASE, ALAMY STOCK PHOTO (*3*)



EL HOGAR no era solo el lugar donde se dormía, sino también donde se adoraba a los dioses y se trabajaba. Los esqueletos enterrados en el subsuelo son una prueba de la faceta espiritual del hogar (*1*). Bolas de arcilla (*2*) que ayudaban a calentar la comida o a entrar en calor durante los fríos días invernales. Las ollas de arcilla (*3*) y los cuchillos de obsidiana (*4*) demuestran que se preparaban alimentos.

Ian Hodder, arqueólogo de la Universidad Standford y director de las excavaciones en Çatalhöyük hasta 2018, apoyó los métodos de Tringham. Los arqueólogos tradicionales han estudiado los artefactos extrayéndolos de los yacimientos y llevándoselos a los museos. Hodder difundió la idea de la «arqueología contextual», según la cual no se deberían analizar los artefactos de forma aislada, sino pensar en cómo encajan en el lugar en que fueron descubiertos. En el caso de Çatalhöyük, la arqueología contextual dio a investigadores como Tringham un marco en el que interpretar por qué había objetos sagrados en medio de las estancias domésticas: las personas creaban espacios rituales en su hogar.

A diferencia de las ciudades que se levantaron más tarde, donde se construían espacios separados para el culto, el trabajo y la vida doméstica, los habitantes de Çatalhöyük los reunían todos bajo el mismo techo. Esa es la razón por la que sus moradas semejaban una combinación de templo, taller y dormitorio. Hodder cree que estas viviendas multifuncionales representan una etapa clave en el proceso de la domesticación humana, cuando numerosas personas abandonaron la vida nómada para asentarse, cultivar la tierra y criar animales. Al principio, la casa era solo el lugar donde se dormía y se trabajaba. Pero con el tiempo, tal como afirma Hodder, las personas forjaron un vínculo mental con su tierra; se podría decir que pasaron de ser un grupo de agricultores que vivían en la llanura de Konya a ser çatalitas. La ciudad formaba parte de su identidad y acabaron atribuyendo un significado espiritual al lugar en que vivían. Durante el proceso, las casas se convirtieron en hogares. En las ciudades posteriores, los espacios destinados al culto, el trabajo y la vida doméstica quedaron separados, pero

JASON QUINLAN (1, 3, 4); MICHAEL ASHLEY (2)

la idea de que la ciudad era un hogar, no solo un lugar donde descansar, perduró.

SOPA INSTANTÁNEA EN EL NEOLÍTICO

Çatalhöyük nos muestra cómo era la vida cotidiana en una época en que el «hogar» era una idea radicalmente nueva. Los habitantes tenían que desempeñar multitud de tareas para mantener la casa y la familia, pero destinaban gran parte del tiempo a obtener y elaborar la comida. Sabemos que eran agricultores, que cuidaban de campos familiares y de rebaños en la fértil llanura de Konya, lo que les dotó de la fuente estable de alimento que necesitaban para vivir todo el año en sus hogares permanentes. Fabricaban una amplia variedad de utensilios de cocina, desde cuchillos de despiece a cuencos. Y ahora, gracias a análisis punteros de los recipientes de cocción, sabemos qué comían.

«Es como analizar la historia de un crimen», explica la arqueóloga Eva Rosenstock con una sonrisa, mientras describe el modo en que ella y su colaboradora Jessica Hendy se sirvieron de métodos forenses para extraer moléculas reveladoras de los restos de alimentos que quedaron pegados dentro de esos recipientes. Esta investigadora asociada al Centro Einstein Chronoi, en Berlín, ha estudiado durante la mayor parte de su carrera la alimentación y la salud durante el Neolítico. Conoció a Hendy hace algunos años en una conferencia en la que esta explicó cómo había averiguado qué comían las personas durante la Edad Media examinando el sarro incrustado en el esmalte dental. Atrapadas en él quedan trazas de lípidos y proteínas, compuestos presentes en todos los seres vivos, incluidos los que comemos. Hendy identificó los alimentos medievales mediante el cotejo de las estructuras moleculares de los lípidos y las proteínas hallados entre los dientes sucios con los de animales y plantas conocidos.

Aquel fue un momento de revelación para Rosenstock. Durante el examen de unos fragmentos de cuenco hallados en Çatalhöyük había visto una fina capa de calcita en el interior, «como la cal incrustada en las teteras», explica. Convenció a Hendy para que examinase esas escudillas antiguas en busca de moléculas que pudiesen revelar qué se comía durante el Neolítico.

Hubo un impás de gran nerviosismo cuando las coincidencias obtenidas por Hendy en los primeros análisis señalaban a peces exóticos de acuario y flores de loto, resultado de la contaminación de la muestra con moléculas modernas. Por suerte, los análisis ulteriores revelaron equivalencias moleculares mucho más cercanas a otros comestibles, los que buscaban. Rosenstock, Hendy y sus colaboradores descubrieron trazas de guisantes, trigo, cebada, cabra, oveja, bóvidos e incluso algún venado. Pero el hallazgo más interesante fue que todos los recipientes habían contenido leche, mucho antes de que la mayoría de los humanos adquiriésemos la mutación genética que permite metabolizar los lácteos en la edad adulta. De hecho, los restos lácteos de Çatalhöyük se cuentan entre los más antiguos jamás recuperados. Esto no significa que los comensales de la ciudad enfermaran, como ocurre hoy con las personas intolerantes a la lactosa. Una investigación reciente revela que el microbioma intestinal, el conjunto de bacterias y demás microbios que habita en ese órgano, nos ayuda a digerir la leche. De esta manera, los investigadores pudieron echar un vistazo al momento en que los adultos comenzaron a cocinar con leche. Durante los milenios siguientes, la mutación que facilita la digestión de la lactosa en la vida adulta se difundió por Europa y Oriente Medio.

Rosenstock cree que los residuos lácteos revelan asimismo una antigua estrategia para ahorrar trabajo. En el Neolítico, los productos lácteos eran estacionales. Los animales parían en primavera, por lo que en invierno habrían dejado de dar leche. Para disfrutar de ella todo el año, las comunidades de todo el mundo inventaron el queso y otros lácteos fermentados que podían guardar largo tiempo. En Turquía y en las regiones colindantes se prepara un plato de leche agria seca conocido como qurut o kashk. A veces se moldea en bolas y a veces se elabora un polvo; para aderezarlo, la leche se puede fermentar con especias molidas. Los habitantes de Çatalhöyük debían de preparar algo parecido. «Aprendes a elaborar este producto tan fácil de almacenar, que además no se enrancia en años», señala Rosenstock. «Le añades agua caliente, ¡y ya tienes algo parecido a una sopa instantánea!» Perfecto para tomar en casa durante un frío día de invierno, cuando nadie quiere salir al campo o a cazar.

EL ENIGMA DE LAS BOLAS DE ARCILLA

Los artesanos de Çatalhöyük también disponían de otros trucos para economizar esfuerzos. Hace unos 8500 años, siglos antes de que se fundara la ciudad, ya se había inventado la cerámica cocida. Fue un avance tan revolucionario en el Neolítico como lo fue el microondas para las personas impacientes y hambrientas de la década de 1970. Cocinar sin cerámica era un proceso que exigía mucho trabajo. La antropóloga de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Sonya Atalay, encontró pruebas de que se cocían guisos en cestas tejidas impermeables. Viertes el agua y los ingredientes que deseas en la cesta y la depositas sobre piedras grandes o bolas de arcilla que se han calentado al fuego. Cuando las bolas se enfrían, se sacan y sustituyen por otras calientes. No hay duda de que era un proceso tedioso, especialmente después de una larga jornada dedicada a la recolección de comida y agua.

> Cuando la gente empezó a construir casas duraderas y grandes asentamientos, tuvo que habituarse a vivir en un lugar, pared con pared con sus vecinos

La visión de Atalay sobre la actividad culinaria antes de la aparición de la cerámica se basa en dos tipos de pruebas. Primero, hay pueblos modernos que siguen cocinando con piedras candentes por tradición. Y segundo, en el asentamiento de Çatalhöyük encontramos montones de piedras de arcilla, más o menos del tamaño de un pomelo, cubiertas de marcas causadas por el fuego. En algunas casas se cuentan por cientos, esparcidas por el suelo y alrededor de los hogares. Para Atalay, parece obvio su uso culinario.

La gran mayoría de los habitantes de Çatalhöyük abandonó las bolas de arcilla y las cestas tejidas en favor de la cerámica, pues su resistencia al fuego permitió colocar los recipientes en soportes sobre la fogata, para cocinar guisos todo el día. Debió ser todo un lujo poder prescindir de los malabares con las bolas ardientes.

Esta historia solo plantea un problema. Los análisis a que se sometieron las bolas de arcilla en busca de lípidos y proteínas parecidos a los presentes en los cuencos de Rosenstock no revelaron nada. Parecía claro que eran calentadas y usadas en la cocina, pero no entraban en contacto con la comida. Así pues, ¿con qué fin se utilizaban?

La arqueóloga Lucy Bennison-Chapman, de la Universidad de Leiden, ha dedicado años al estudio de las bolas con algunos descubrimientos sorprendentes. Si bien no descarta por completo su inmersión en los guisos, lo cree sumamente improbable por el gran tamaño, así como por los pedacitos de arcilla y la suciedad que se habrían desprendido en la comida. También excluye la posibilidad de que fueran armas. «No se parecen a los proyectiles de las hondas, que son más pequeños y suelen tener una forma diferente», señala.

Cree, en cambio, que las bolas grandes se usaban para calentar. En algunos casos, se revestía con ellas el fondo de los hornos para mantener el calor. También pudieron ser el equivalente de la Edad de Piedra de las bandejas calentadoras: una vez sacadas del fuego, se cubrirían con esteras de caña y se colocaría la comida encima. Existe otra posibilidad más, que resultará familiar a los lectores de las novelas de Charles Dickens, en las que algún personaje colocaba ladrillos calientes en su cama por la noche. «En la llanura de Konya hace mucho frío en invierno. Podías calentarlas para entibiar el cuerpo con ellas. O envolverlas en algún tejido y entremeterlas en la ropa de cama», explica Bennison-Chapman. «Se trabajaba en los tejados y en el campo, por lo que podías meterte una bola caliente en los bolsillos mientras permanecías afuera. Esto explicaría por qué se recalentaban y reutilizaban con tanta asiduidad.»

A las personas de hoy nos resulta difícil imaginar el esfuerzo que exigía la vida cotidiana en una casa de aquella época

La fabricación de estas versátiles bolas consumía una gran cantidad de tiempo. «Debían pasar largas horas repasándolas a mano, alisándolas. Están llenas de huellas dactilares», comenta Bennison-Chapman. «Es posible que a causa del tiempo que exigía su fabricación, las recalentasen una y otra vez hasta que al final se resquebrajaban. La mayoría de las halladas en Çatalhöyük estaban partidas en pedazos. Algunas las reciclaban y las convertían en ladrillos de arcilla, o las empotraban en las paredes, puede que como aislamiento.

Las bolas también eran importantes por otra razón. Además de las grandes calefactoras, también se fabricaban otras en miniatura, algunas decoradas ocasionalmente con puntos y otros motivos. Estas minibolas, o fichas, son los primeros ejemplos en Çatalhöyük de «fichas para contar», llamadas así por quienes piensan que se destinaban a mantener un registro sencillo o contabilizar los recursos. Sin embargo, Bennison-Chapman disiente y opina que no fueron creadas con tal fin: seguramente se usaban en algún juego, como pesas, objetos rituales o incluso como decoración. Sea como fuere, demuestran que la vida doméstica no giraba solo en torno a la cocina y el mantenimiento de un cobijo acogedor frente a la intemperie. Los objetos creados en Çatalhöyük conducirían finalmente al cálculo y la escritura.

EN NINGÚN LUGAR COMO EN CASA

El Neolítico supuso un período de rápido cambio para la humanidad, sobre todo en lo que concierne a la definición de la vida hogareña. Hasta hace 12.000 años, muy pocas personas vivían en asentamientos agrícolas todo el año, la mayoría eran nómadas o seminómadas que vagaban de un lugar a otro en grupos pequeños, como cazadores y recolectores al compás de las estaciones y de la abundancia de alimento. Así que cuando la gente empezó a construir casas duraderas y grandes asentamientos, tuvo que habituarse a vivir en un solo lugar, pared con pared con sus vecinos.

La mayoría lo hizo levantando sus hogares conjuntamente, no solo compartiendo el trabajo agotador, sino también las alegrías de la vida en comunidad. John S. Allen, antropólogo de la Universidad de Indiana en Bloomington, es autor del libro *Home: How habitat made us human*, publicado en 2015. «Un hogar es un espacio al que quedas ligado emocionalmente a través del uso cotidiano», señala. Esta debió ser una razón por la que las tumbas de Çatalhöyük están bajo el suelo de las casas. «Un sepulcro es un lugar especial para la familia y los amigos», plantea Allen, que pone de relieve la idea del hogar como un espacio emocional, además de práctico.

Cuando Rosenstock describió todos los alimentos que comían los habitantes de Çatalhöyük, un tema surgía una y otra vez: su profunda convicción de que tarde o temprano descubrirían pruebas de la elaboración de cerveza. Esta responde en parte a las pruebas encontradas de la producción de esa bebida en otras culturas neolíticas de todo el mundo, pero también a los numerosos indicios de que en la protociudad se celebraban muchas fiestas. «La acumulación de restos de cerámica es enorme; la fabricaban y la tiraban sin miramientos. No puedes evitar pensar que comían y rompían las ollas», señala. También lanzaban huesos con restos de carne adheridos, como ocurriría en un banquete.

Construir una ciudad no tiene que ver únicamente con el trabajo. También tiene que ver con las celebraciones. Puede que, en el amanecer de la vida urbana, el trabajo y los festejos fueran dos caras de la misma moneda: la urdimbre y la trama que nos arraigaron a un único lugar, al que comenzamos a llamar hogar. IyC

PARA SABER MÁS

Clay balls and clay objects. Lucy Bennison-Chapman en *Çatalhöyük Archive Report 2017*, capítulo 19, págs. 255-262, 2017.

Ancient proteins from ceramic vessels at Çatalhöyük West reveal the hidden cuisine of early farmers. Jessica Hendy, Andre C. Colonese, Ingmar Franz et al. en *Nature Communications*, vol. 9, artículo n.º 4064, 2018.

Página web del proyecto de investigación de Çatalhöyük http://www.catalhoyuk.com/

EN NUESTRO ARCHIVO

El hombre neolítico y la muerte. Alain Gallay en *IyC*, octubre de 1991.

La división sexual en Çatalhöyük. Ian Hodder en *IyC*, marzo de 2004.

Modelos matemáticos de la transición neolítica. Joaquim Fort en *IyC*, julio de 2015.

Göbekli Tepe, espejo de la transición neolítica. Marion Benz en *IyC*, marzo de 2018.


COVID-19
UN RETO CIENTÍFICO Y SOCIAL

MUCHO MÁS ALLÁ DEL LECHO MARINO, en la corteza oceánica, se están descubriendo microorganismos a profundidades cada vez mayores, lo que hace sospechar que la combinación correcta de rocas y agua podría bastar como sustento para la vida en casi cualquier lugar.

MICROBIOLOGÍA

VIDA EN LAS PR
DEL SUBSUE

El mundo microbiano recién descubierto del fondo oceánico, apunta a la posible



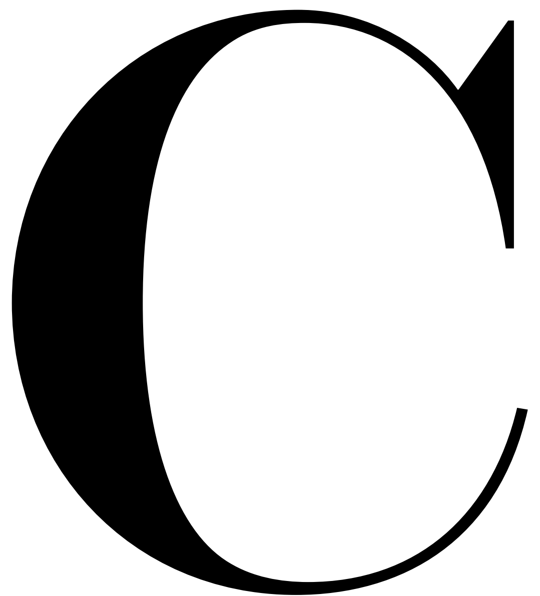
OFUNDIDADES LO MARINO

Jordana Cepelewicz

en antiguas rocas basálticas, muy por debajo existencia de vida en otras partes del universo

Jordana Cepelewicz, graduada en matemáticas y literatura comparada, es redactora de *Quanta Magazine*. Escribe sobre biología, neurociencias y matemáticas, entre otros temas.





ON UNA RESISTENCIA CASI INCREÍBLE, LOS MICROORGANISMOS medran en manantiales hirvientes, desiertos totalmente secos, charcas ácidas y hielos polares, tanto a kilómetros de altura como a kilómetros de profundidad bajo el lecho marino. Y, aunque los científicos anhelan descubrir microbios en dominios aún más desapacibles, más allá de nuestro sistema solar, es en la última frontera terrestre, el subsuelo profundo, donde ahora progresan sus trabajos sobre la extrema capacidad de adaptación de la vida.

Desprovisto de luz y de nutrientes esenciales, sometido a presiones inconcebibles, el subsuelo más profundo parecería un lugar despiadadamente inhóspito. Sin embargo, constituye uno de los mayores hábitats de la Tierra. Su singularidad, además, obliga a los expertos a considerar la existencia de sistemas biológicos que emplean fuentes de energía y se rigen por escalas de tiempo completamente diferentes a las que estamos acostumbrados los habitantes de la superficie.

Los científicos llevan décadas estudiando cómo y dónde persisten, e incluso proliferan, los microbios bajo los océanos, lejos de la luz solar. La mayoría de las investigaciones se han centrado en los sedimentos marinos, el lodo y los detritos altamente compactados, que en algunos lugares alcanzan varios kilómetros de espesor. Pero debajo yace la roca volcánica, la corteza en sí misma, y allí la vida es todavía más difícil de acceder y de analizar. Además, las muestras escasean.

«Todavía no disponemos de un mapa del paisaje microbiano del subsuelo profundo», explica Karen Lloyd, microbióloga de la Universidad de Tennessee, en Knoxville. Por tanto, según la experta, los que estudian la diversidad de sus ambientes ni siquiera pueden hacer generalizaciones simples, como la que afirma que «los bosques tienen árboles y los peces nadan en los océanos».

Pero los últimos descubrimientos han abierto por fin una ventana a ese mundo y a los microbios que lo habitan. Igualmente, nos han ofrecido un atisbo sobre el origen y la evolución de la vida, no solo en nuestro planeta, sino posiblemente en otras partes del universo.

VIDA SIN SOL

El estudio de la corteza terrestre ha sido en gran medida competencia de los geólogos. Los primeros indicios de que también podrían ser del interés de los microbiólogos se remontan a 1926, cuando se descubrieron bacterias en los pozos petrolíferos profundos de Illinois. Sin embargo, ese hallazgo no se tomó en serio durante décadas: la contaminación de las muestras parecía mucho más probable que la posibilidad de que existieran organismos tan desconectados de la fotosíntesis, un proceso impulsado

EN SÍNTESIS

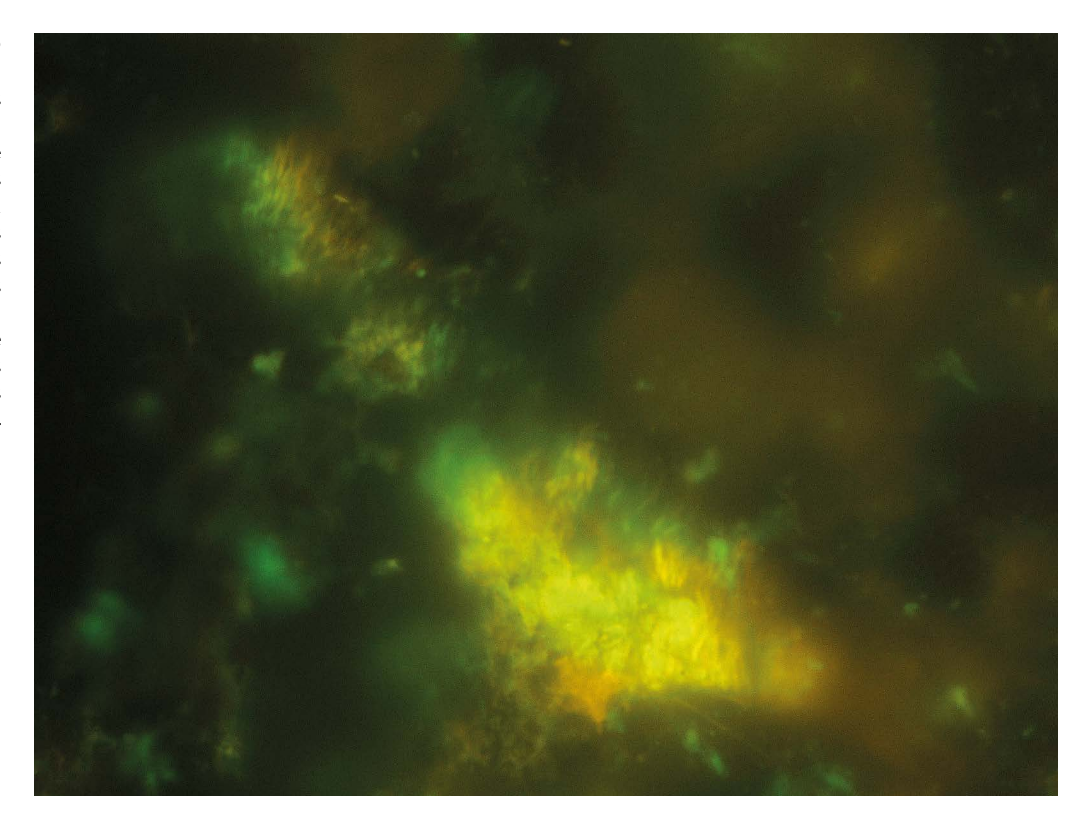
Desde hace décadas se vienen estudiando los ambientes más extremos e inhóspitos donde puede persistir la vida microbiana, lejos de la luz solar.

Hace poco se ha dado un paso más y se han descubierto microorganismos en rocas volcánicas situadas muy por debajo del fondo marino, en la misma corteza oceánica.

Los nuevos estudios describen sistemas biológicos que emplean fuentes de energía y se rigen por escalas de tiempo distintas a las habituales, lo que hace pensar en la existencia de vida en otras partes del universo.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/RATPACK223/ISTOCK

LA ELEVADA DENSIDAD de bacterias que habitan en el interior de las rocas basálticas del subsuelo marino se pone de manifiesto en estas imágenes de microscopía de fluorescencia. Las células están teñidas de color verde; las zonas amarillas indican los lugares donde hay microorganismos dentro de los agregados arcillosos.



por el sol que sustenta la vida en el resto del planeta. Tampoco ayudó que, en la década de los cincuenta, dos microbiólogos realizaran unos experimentos que los llevaron a fijar el límite inferior de la biosfera en los sedimentos situados a unos pocos metros por debajo del lecho marino.

En 1977, todo empezó a cambiar. A bordo de un submarino, un equipo de científicos exploró una cresta oceánica que se extendía entre dos placas tectónicas cerca de las islas Galápagos y descubrió las primeras chimeneas hidrotermales. Allí, la Tierra arrojaba nubes de humo negro al mismo tiempo que de las grietas de las rocas emanaban unos fluidos muy calientes y ricos en minerales que se mezclaban con el agua marina, extremadamente fría. Alrededor de las chimeneas florecía todo un ecosistema donde habitaban gusanos tubícolas, almejas gigantes y crustáceos sin ojos. Y resultó que en el lugar moraban también una ingente cantidad de microbios que les servían de sustento [*véase* «Simbiosis en las profundidades marinas», por James J. Childress, Horst Felbeck y George N. Somero; Investigación y Ciencia, julio de 1987]. «Allí, en aquellas regiones oscuras y profundas del océano donde no esperaban hallar vida, la encontraron», explica Barbara Sherwood Lollar, geóloga de la Universidad de Toronto. Era, «en verdad, una forma de vida que desconocíamos».

Por primera vez, los científicos se dieron cuenta de que podían existir ecosistemas terrestres que no dependieran del sol. El motor de los organismos microbianos no era la energía solar, sino los minerales y los compuestos químicos liberados en las chimeneas hidrotermales. Tales organismos desafiaban nuestro conocimiento sobre la vida y sus límites.

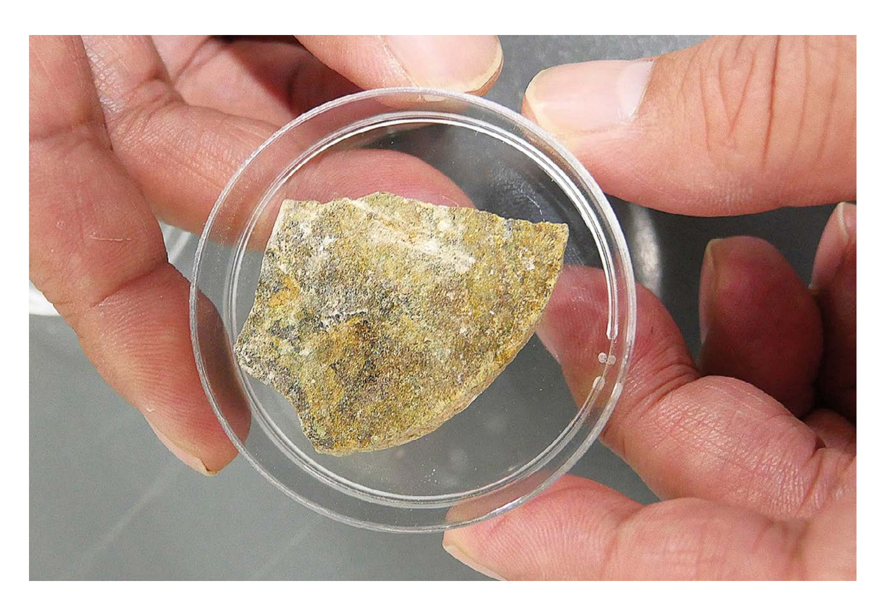
En las décadas de los ochenta y noventa del pasado siglo, se hallaron nuevos indicios de un reino carente de iluminación pero habitado: las rocas situadas bajo los continentes y los océanos mostraban signos de una meteorización que no parecía responder únicamente a reacciones abióticas. En una serie de proyectos de perforación, tanto terrestres como marítimos, se descubrieron células vivas y secuencias de ADN en todo tipo de ambientes, lo que llevó a pensar que los microbios del subsuelo constituían una mayoría oculta y ubicua que superaba con creces el número de células microbianas existentes en el mundo suprayacente. Los cálculos actuales, de hecho, sitúan el número de microbios subsuperficiales en el orden de 10^{30} células, un orden de magnitud mayor que el número estimado de microbios que habitan en el suelo o en el océano abierto. «La biosfera profunda es inmensa. Lo que cautivó a los microbiólogos fue esa [posible] dimensión», señala Virginia Edgcomb, microbióloga marina del Instituto Oceanográfico Woods Hole, en Massachusetts.

Y en cualquier lugar donde se ha estudiado ese vasto reino, por muy profundo y pobre en nutrientes que pareciera, se ha hallado vida.

PROLIFERAR EN OTRA ESCALA DE TIEMPO

El dominio que se extiende bajo el lecho marino puede dividirse en dos compartimentos: sedimentos y rocas. El primero comprende la capa de lodo y detritos acumulados en el fondo oceánico, cuya estructura se asemeja a la de una esponja densa. Aunque el 90 por ciento de su peso podría ser agua, nada puede fluir a su través de manera eficiente. Al contrario, los fluidos y los compuestos químicos se difunden por ella lentamente. En esencia, las células microbianas permanecen enterradas junto con otros materiales que podrían aprovechar para obtener energía.

En las áreas someras, particularmente cerca de las costas, donde los nutrientes son más abundantes, la vida enterrada prolifera. En un centímetro cúbico de sus sedimentos pueden llegar a vivir hasta 1000 millones de microorganismos. A medida que los investigadores profundizan en el subsuelo, disminuye



MUESTRA DE ROCA procedente de una perforación en aguas profundas. Yohey Suzuki, de la Universidad de Tokio, y sus colaboradores han desarrollado una forma novedosa de identificar y contar las células que viven dentro de ese tipo de rocas.

el número de células que encuentran. Pero, aun así, siempre parecen hallar algo. Al excavar en sedimentos marinos hasta los 2500 metros de profundidad, han descubierto unas pocas células microbianas por centímetro cúbico, lo que roza el propio límite de su capacidad de detección.

Tales células apenas parecen estar vivas, al menos según nuestros estándares. Viven a un ritmo sumamente lento, rara vez se dividen y su consumo energético es en ocasiones seis órdenes de magnitud menor que el de las células que viven en hábitats superficiales. «Pueden tardar entre 100 y 1000 años en dividirse una sola vez», señala Martin Fisk, ecólogo oceánico de la Universidad Estatal de Oregón. «Viven a un ritmo muy pausado.»

Steve D'Hondt, oceanógrafo de la Universidad de Rhode Island, las llama «células zombi». Pero, en realidad, están vivas; simplemente no se rigen por las escalas de tiempo habituales. La forma en que observamos ese tipo de actividad celular podría compararse con el modo en que un efemeróptero percibe la vida de un árbol: el insecto muere mucho antes de que pueda comprender realmente cómo se desarrolla y se mantiene el árbol.

Sin embargo, en las rocas basálticas que yacen bajo los sedimentos la dinámica podría ser distinta. A diferencia del lodo compactado, las rocas presentan poros, grietas y fisuras por las que circula el agua marina, y con ella, la materia orgánica de la que pueden nutrirse los microorganismos.

Desafortunadamente, acceder a tales rocas y obtener muestras no contaminadas supone un reto de mayor envergadura. Si bien los sedimentos pueden muestrearse introduciendo en ellos un tubo vertical, la roca resulta demasiado dura para emplear esa técnica. En su lugar, los científicos deben utilizar un taladro y lubricarlo con una mezcla fluida de agua marina y lodo, un proceso que contamina los bordes y las grietas de las muestras con material biológico procedente de más arriba.

Por tanto, para investigar qué organismos podrían habitar en el interior de las rocas, los microbiólogos deben limpiarlas, enjuagarlas con alcohol, quemar su superficie y romperlas. Pese a ello, tales métodos tienden a revelar un número muy limitado de células y, en ausencia de pruebas fotográficas que los acompañen, «siempre es muy difícil afirmar que la muestra procede realmente de esas rocas y que no se trata de contaminación», explica William Orsi, geomicrobiólogo de la Universidad de Múnich.

La mayoría de los escasos estudios que han examinado las formas de vida presentes en los basaltos se han limitado a las rocas próximas a las chimeneas hidrotermales o al lecho marino recién formado, unos sustratos relativamente jóvenes que solo alcanzan los 8 millones de años de antigüedad. La elección responde a que en las rocas más recientes es donde el agua marina circula con mayor facilidad y renueva el suministro de nutrientes del que dependen los microbios. Las rocas también son más reactivas químicamente y ciertos microbios «petrófagos» pueden aprovechar esas reacciones como fuente de energía.

Sin embargo, a medida que el basalto se enfría y se aleja de su lugar de origen a lo largo del fondo oceánico, hacia las zonas de subducción, sus numerosos poros y grietas se rellenan de minerales de precipitación química, lo que limita el flujo de agua y nutrientes y da lugar a un sistema más aislado. Hasta hace poco, no estaba claro si la vida podría desarrollarse en tales condiciones.

VIDA EN BASALTOS ANTIGUOS

El año pasado, un equipo de científicos en Japón informó sobre el hallazgo de vida en basaltos extraídos de la corteza oceánica. Las rocas, obtenidas mediante perforación hasta los 120 metros de profundidad, tenían entre 33 y 104 millones de años de edad. Según Lloyd, que no participó en el estudio, tal antigüedad ya era de por sí fascinante. «Los dinosaurios caminaban por la Tierra cuando se formaron.»

Las rocas de la corteza oceánica presentan poros, grietas y fisuras por las que circula el agua marina, y con ella, la materia orgánica de la que pueden nutrirse los microorganismos

Pero más sorprendentes eran aún las densidades con las que medraban los microbios en las rocas. Gracias a una nueva técnica para contar con precisión las células contenidas en las muestras, los investigadores descubrieron que se concentraban en cierto tipo de fisuras rellenas de minerales. Allí formaban una especie de biopelícula en la que contaron hasta 10.000 millones de microorganismos por centímetro cúbico. «No pensábamos

Viaje microbiano al centro de la Tierra

Los microorganismos pueden persistir, e incluso proliferar, en distintos ambientes inhóspitos suboceánicos. Se está investigando cómo consiguen sobrevivir en ausencia de energía solar y de nutrientes procedentes de la superficie.

A

OCÉANO
Las algas fotosintéticas, las bacterias y las plantas conforman la base de los ecosistemas marinos, donde habitan microbios, peces y otros animales. En las zonas más profundas, los organismos sobreviven al alimentarse de las células muertas que se hunden hacia el fondo oceánico.

B

COMUNIDADES EN CHIMENEAS
Gusanos tubícolas, almejas gigantes, crustáceos sin ojos y otras especies tienen como sustento microbios que obtienen energía de los compuestos químicos que emanan de las chimeneas hidrotermales.

C

SEDIMENTOS
Los microbios sobreviven en sedimentos profundos muy compactados gracias a una alimentación basada en la materia orgánica enterrada con ellos en el lodo. La cantidad de células microbianas disminuye con la profundidad.

D

BASALTO (CORTEZA SUPERIOR)
Los microbios viven en los poros y las fisuras del basalto. Algunos se alimentan de la materia orgánica que penetra con el agua marina por las grietas. Otros obtienen la energía de los minerales presentes en las rocas o de los productos de la interacción entre el agua y la roca.

E

GABRO (CORTEZA INFERIOR)
Los últimos estudios indican que una pequeña cantidad de microbios podría habitar en la corteza inferior. Los nutrientes presentes en el agua infiltrada y los subproductos de la radiactividad podrían servirles de sustento.

A OCÉANO
B CHIMENEAS
C SEDIMENTO
D BASALTO
E GABRO

Las rocas, el suelo y los detritos se hunden para formar sedimentos.

Las chimeneas arrojan fluido caliente rico en minerales.

El agua marina se infiltra por las grietas y se calienta por acción del magma.

El enfriamiento rápido del magma genera basaltos.

El enfriamiento lento del magma genera gabros.

Magma

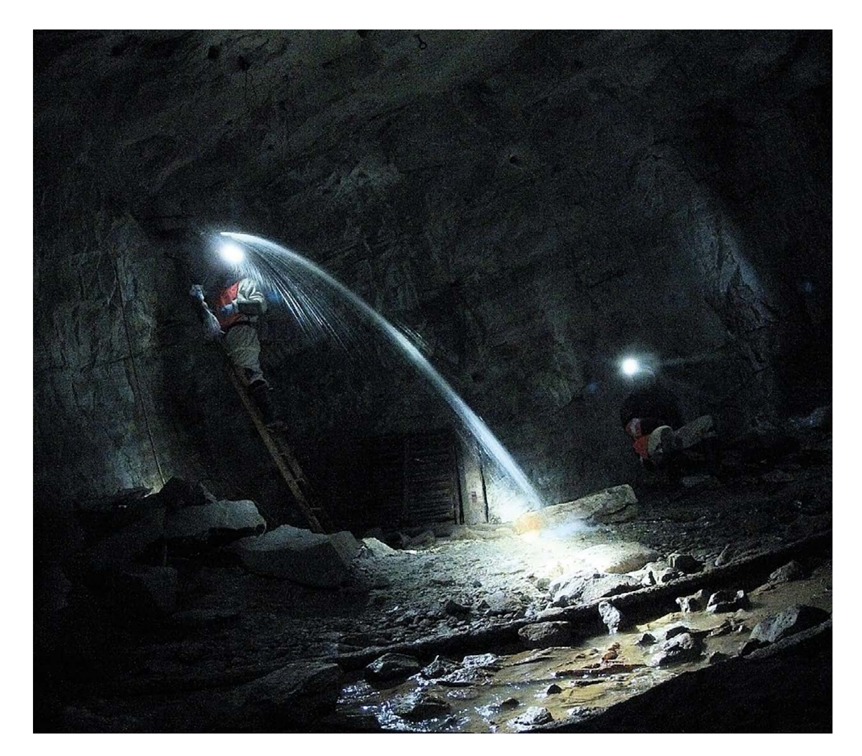
El diagrama no está representado a escala

LUCY READING-IKKANDA/QUANTA MAGAZINE

que habría tantas células en unas rocas tan antiguas, frías y duras», admitió Yohey Suzuki, geólogo de la Universidad de Tokio y autor principal del estudio, que se publicó en *Communications Biology*. Los investigadores lograron también cartografiar con qué tipos de minerales se asociaban las células. Según ellos, las bacterias sobrevivían gracias a la materia orgánica atrapada en esos minerales. «El hallazgo amplía la región del fondo oceánico hasta donde puede hallarse vida microbiana», afirma Jason Sylvan, biogeoquímico de la Universidad de Texas A&M, que no participó en la investigación.

De hecho, el hallazgo pone de manifiesto que la receta para la existencia de vida podría ser menos estricta de lo que se pensaba. Puede que a la vida le baste como sustento solo una combinación de rocas y el flujo de un fluido.

La idea no es totalmente nueva. En la última década se han obtenido pistas en lugares como Sudáfrica y Canadá, donde las



EL AGUA QUE SE VIERTE en este pozo minero sudafricano da cuenta del abundante líquido que circula a través de fisuras y fracturas que se extienden muy por debajo de la superficie terrestre. Los científicos analizan el tiempo que ha permanecido aislada esa agua del mundo superficial.

excavaciones en minas terrestres profundas han alcanzado rocas formadas miles de millones de años antes que los basaltos más antiguos del fondo oceánico. Sherwood Lollar, junto con Tullis Onstott, de la Universidad de Princeton, y otros colaboradores se han adentrado en esas minas para estudiar lo que ellos mismos denominan la «hidrogeosfera oculta», un conjunto de sistemas hídricos aislados en las profundidades del subsuelo que se rigen por largas escalas de tiempo geológico. En algunos casos han descubierto agua que no ha estado expuesta a los factores ambientales superficiales durante millones o incluso miles de millones de años. Y en esa agua de mil millones de años de edad, han hallado vida.

También han demostrado que tales microbios sobreviven gracias a la energía procedente de un proceso abiótico conocido como radiólisis. La radiación emitida por las rocas reacciona con el agua del sistema y libera hidrógeno, que las células aprovechan de distintas formas como combustible. El hallazgo suscitó una intrigante pregunta: ¿podría la radiólisis ser un proceso alternativo que impulsara gran parte de la vida subterránea?

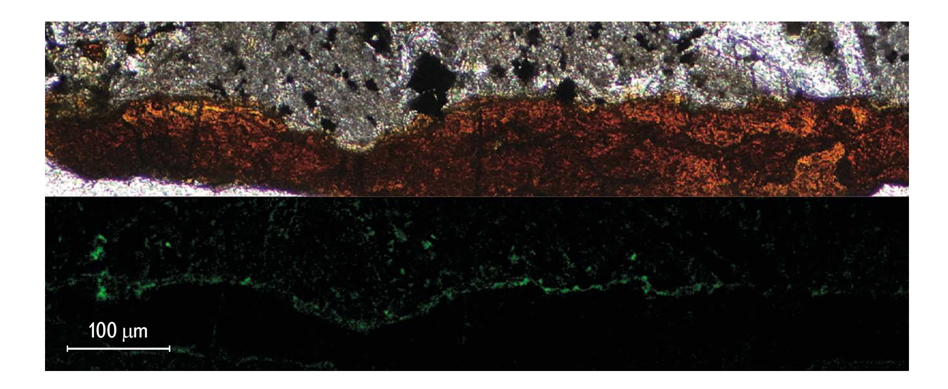
Puesto que la radiólisis ocurre en todas partes, «también podría sustentar la vida en las profundidades del océano», postula Orsi. «Nadie lo sabe.»

En los ambientes marinos, que presentan un mayor flujo de fluidos y un menor aislamiento, resulta mucho más difícil hallar indicios de ese proceso. Pero D'Hondt, que participó en el estudio de los basaltos antiguos del subsuelo marino, postula que las bacterias descubiertas recientemente en tales rocas también podrían depender de la radiólisis. «Cuesta imaginar que haya suficiente materia orgánica en ese ambiente para mantener semejantes densidades celulares», explica. Puede que ahí la radiólisis también entre en juego. El relativo aislamiento del hábitat, debido al relleno mineral de los huecos, lo convierte en un intrigante objeto de estudio en futuras investigaciones.

En todo caso, «lo que en esencia hemos aprendido a partir de los estudios [terrestres] es que la vida puede desarrollarse en casi cualquier grieta que contenga agua», apuntó Jennifer Biddle, científica marina de la Universidad de Delaware. Actualmente, los trabajos realizados por Suzuki, D'Hondt y su equipo revelan que «el ambiente marino se rige por las mismas reglas que el terrestre: mientras haya espacio y agua, existe la posibilidad de que algo prolifere», añade Biddle. Puede que ese mismo principio se aplique también a la radiólisis. Esta tal vez sea para la vida subterránea lo que la fotosíntesis es para la vida superficial.

Con independencia de si es cierto o no, los científicos han aprendido una importante lección: para entender la vida de las profundidades marinas no basta con observar las rocas. También hay que estudiar el agua; saber si fluye y de qué forma lo hace. A ello se dedican varios grupos que investigan sistemas basálticos en todo el mundo.

Los hallazgos ofrecen también una nueva visión de los posibles límites de la vida. Tradicionalmente, se ha sostenido que esta suele verse restringida por la temperatura. Por encima de los 120 grados Celsius, incluso las células microbianas más resistentes se rompen y mueren. Pero otro de los factores principales parece ser el flujo del agua. Siempre que la



DOS VISTAS de una sección transversal de un basalto subsuperficial antiguo. En la imagen superior, tomada con microscopio óptico, el basalto se aprecia de color gris, mientras que los minerales arcillosos que rellenan la fisura se ven de color anaranjado. En la imagen inferior tomada con microscopio de fluorescencia, las bacterias teñidas de verde brillan en la superficie de estos minerales.

GAETAN BORGONIE (*pozo minero*); DE «DEEP MICROBIAL PROLIFERATION AT THE BASALT INTERFACE IN 33.5–104 MILLION-YEAR-OLD OCEANIC CRUST» SUZUKI ET AL., EN *COMMUNICATIONS BIOLOGY* N.º 3, ART. 136, 2020; CC BY 4.0 (*basalto*)

temperatura no ascienda en exceso, la vida «puede proliferar en profundidad mientras pueda penetrar el agua marina», afirma D'Hondt.

Quizá lo más relevante de todo sea que los estudios sobre el flujo nos ofrecen un nuevo ángulo desde el que escudriñar los orígenes y la evolución de la vida.

EN LAS ENTRAÑAS DE LA TIERRA Y MÁS ALLÁ

Desde el descubrimiento de las chimeneas hidrotermales, la idea del «pequeño estanque cálido» de Darwin como fuente de vida ha experimentado un cambio, según Lollar. Hoy puede que ya no debamos considerar un pequeño estanque cálido o una chimenea hidrotermal, sino lo que Onstott ha denominado «una pequeña fractura cálida». Más aún si se tienen en cuenta las explosiones y otros factores ambientales hostiles que habrían caracterizado la superficie de la Tierra primigenia. «Con tener solo roca volcánica y agua puedes hacer que se desarrolle la vida», señala Fisk, quien hace poco modeló esa posibilidad.

Es decir, puede que la vida surgiera en la superficie terrestre, allí donde encontrara formas creativas de sobrevivir y extenderse a otros ambientes, incluido el subsuelo. Pero también puede que la vida comenzara bajo tierra, en alguna juntura fortuita entre la roca y el agua; y que, con el tiempo, se abriera paso hacia la superficie y descubriera cómo aprovechar la energía del sol. De hecho, se sabe que la vida superficial, dependiente de la fotosíntesis, y la vida subterránea, dependiente de la radiólisis, tienen un antiguo ancestro común. Sin embargo, algunos investigadores exploran la posibilidad de que la vida hubiera evolucionado más de una vez en la Tierra, en una «segunda génesis».

Todo ello tiene, además, importantes implicaciones en la búsqueda de vida en Marte, en Encélado, el satélite de Saturno, y en los exoplanetas situados más allá de nuestro sistema solar. Dada la prevalencia de agua y rocas volcánicas en todo el universo, «la vida podría haber surgido en cualquier lugar», afirma Fisk.

D'Hondt se muestra de acuerdo. «Desde una perspectiva literalmente universal, deja abierta la posibilidad de que la vida pueda florecer en todo tipo de planetas», señala. «Podría haber formas de vida en otros mundos que no dependan de la fotosíntesis» y que prosperen bajo la superficie, fuera del alcance de la vista.

Aún más emocionante es la posibilidad de que la vida también pueda evolucionar y adaptarse en el subsuelo, quizá de manera muy distinta a como lo ha hecho en la superficie. Vista la lentitud con la que crecen las células bajo el fondo oceánico, ¿podrían también adaptarse a escalas de tiempo mucho más graduales?

En un par de estudios preliminares llevados a cabo en sedimentos más recientes no se han hallado indicios de ese proceso evolutivo. No obstante se han centrado solo en un tipo de ambiente profundo y se remontan a unos 10.000 años atrás, un período de tiempo que podría no ser suficiente para que hubiera podido actuar algún tipo más lento de selección natural. «Pero ¿y si nos remontáramos a un millón o 10 millones de años atrás?», se pregunta Orsi.

Los sedimentos más antiguos, así como otros ambientes del subsuelo marino, como los basaltos examinados por Suzuki y D'Hondt, podrían aportar nuevos conocimientos. Según Lloyd, «si ampliamos las posibilidades a escalas de tiempo cada vez mayores» y ampliamos también los ambientes, «dispondremos de un mayor abanico de probables motores evolutivos».

Aún hoy, los científicos continúan ahondando en la cuestión. Un artículo publicado en *Nature* en marzo de 2020, dirigido por Edgcomb, detalla los resultados de una de las iniciativas más ambiciosas llevadas a cabo hasta la fecha. Perforaron casi 800 metros en el lecho marino, en un lugar donde la corteza oceánica inferior se acerca más a la superficie. Allí tomaron muestras de gabro, un tipo de roca que se forma cuando el magma se enfría lentamente. En general, el gabro se halla debajo del basalto y se considera una especie de ventana al manto, así como al posible ambiente rocoso de una Tierra anterior. Al examinar las rocas, los científicos informaron de la presencia de trazas de células que de nuevo parecían sobrevivir a partir de los nutrientes que obtenían de un flujo de agua marina. Aunque otros investigadores, incluido Orsi, han expresado sus dudas por la posibilidad de que las muestras estuvieran contaminadas, también esperan que los análisis futuros descubran vida en esa región del subsuelo.

Haciéndose eco de la famosa frase de *Parque Jurásico*, Edgcomb señala que, de la manera que sea, «la vida siempre se abre camino». IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

«Follow the water»: Hydrogeochemical constraints on microbial investigations 2.4 km below surface at the Kidd Creek Deep Fluid and Deep Life Observatory. Garnet S. Lollar et al. en *Geomicrobiology Journal*, vol. 36, págs. 859-872, julio de 2019.

Recycling and metabolic flexibility dictate life in the lower oceanic crust. Jiangtao Li et al. en *Nature*, vol. 579, págs. 250-255, marzo de 2020.

Deep microbial proliferation at the basalt interface in 33.5–104 million-year-old oceanic crust. Yohey Suzuki et al. en *Communications Biology*, vol. 3, artículo n.º 136, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Geoquímica de los humeros blancos. A. S. Bradley en *IyC*, febrero de 2010.

La aparente estabilidad de la materia orgánica en el océano profundo. Jesús M. Arrieta y Carlos M. Duarte en *IyC*, marzo de 2016.

¿Con quién compartimos el planeta? Iñaki Ruiz Trillo y Maria Ferrer Bonet en *IyC*, diciembre de 2018.

Buscando vida en el Atacama. Armando Azúa Bustos y Carlos González Silva en *IyC*, enero de 2020.



UN LÁSER crea una «estrella artificial» para calibrar el sistema de óptica adaptativa del Telescopio Muy Grande (VLT) del Observatorio Europeo Austral, en Chile.

TECNOLOGÍA

LA NUEVA VIDA DE LA ÓPTICA ADAPTATIVA

Una herramienta concebida para la astronomía está hallando nuevos usos en la lucha contra la basura espacial y en criptografía cuántica

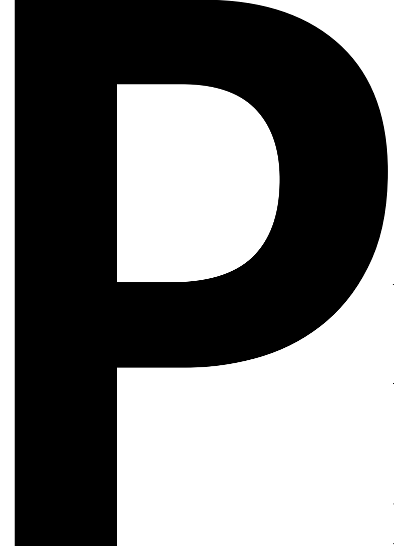
Tony Travouillon, Céline d'Orgeville y Francis Bennet

Y. BELETSKY/OBSERVATORIO LAS CAMPANAS Y OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL (ESO)

Tony Travouillon es profesor de astronomía e instrumentación científica en la Universidad Nacional de Australia.

Céline d'Orgeville es catedrática de astronomía e instrumentación espacial en la Universidad Nacional de Australia.

Francis Bennet es profesor de instrumentación óptica en la Universidad Nacional de Australia.



ARA LOS ASTRÓNOMOS SE TRATA DE UN MOMENTO MÁGICO: ESTÁS MIRANdo una pantalla y, de repente, la imagen desenfocada de un astro se define y revela todos sus detalles. A esto lo llamamos «cerrar el bucle», en referencia al bucle de control de la óptica adaptativa. Esta técnica permite a los telescopios corregir los efectos de distorsión causados por la turbulencia atmosférica. En términos simples, hace que las estrellas dejen de titilar y consigue que una imagen borrosa se torne nítida.

Una noche del año pasado, nuestro equipo de la Universidad Nacional de Australia estaba cerrando el bucle de un nuevo sistema de imagen diseñado para distinguir residuos espaciales. Sentados en la sala de control de nuestro observatorio del monte Stromlo, con vistas a Canberra, escogimos para esta primera prueba un satélite meteorológico. Era un objetivo fácil: su gran armazón y sus paneles solares resultaban inconfundibles y ofrecían una buena manera de evaluar el comportamiento de nuestro sistema.

Algunos de nosotros jamás habíamos usado un telescopio para observar algo que no fuera una estrella, una galaxia u otro objeto astronómico. Aquel satélite era uno de los miles de objetos artificiales que hoy en día rodean nuestro planeta: un enjambre de aparatos espaciales —la mayoría de ellos inactivos— que amenazan cada vez más con acabar atestando las órbitas cercanas a la Tierra. Nuestra prueba se enmarcaba en una iniciativa para construir sistemas que aborden el problema de la basura espacial y salvaguarden esos corredores orbitales para su uso futuro. Esta es una de las nuevas formas en que se está empezando a usar la óptica adaptativa, tradicionalmente restringida a las observaciones astronómicas. Después de más de tres décadas perfeccionando la técnica, los astrónomos nos hemos percatado de que es posible aplicar tales conocimientos a cualquier problema que requiera enviar o recibir fotones entre el espacio y la Tierra.

LA LUCHA CONTRA LA ATMÓSFERA

La capa de gas que separa la Tierra del resto del cosmos nos mantiene vivos, pero también altera continuamente la trayectoria de cualquier fotón que la atraviese. Este proceso se debe a la turbulencia atmosférica, la cual se produce cuando se mezclan regiones de aire a distintas temperaturas. Al pasar de un medio a otro, la luz se refracta, razón por la que la inclinación de una pajita sumergida en un vaso de agua parece distinta por debajo el líquido y por encima de él. Lo mismo ocurre cuando la luz viaja a través de regiones de aire que se hallan a temperaturas diferentes: al pasar del aire caliente al frío, la luz se ralentiza y modifica su trayectoria.

Ese efecto es el que hace que las estrellas titilen y que los astrónomos experimenten tantos problemas para obtener imágenes nítidas del firmamento. El impacto de la turbulencia atmosférica puede cuantificarse por medio de un parámetro conocido como «calidad de imagen» (*seeing*), el cual describe el tamaño angular de la mancha borrosa en que se convierte una estrella

EN SÍNTESIS

La óptica adaptativa es una técnica empleada desde hace décadas por los astrónomos para corregir la distorsión causada por la atmósfera en las imágenes que captan los telescopios. En los últimos años, ha alcanzado un enorme nivel de madurez.

Eso ha abierto la puerta a emplearla con otros fines que impliquen enviar o recibir luz del espacio. Uno de ellos es la posibilidad de monitorizar la basura espacial, así como la de desviar objetos en órbita mediante haces láser.

Otra aplicación se halla en las comunicaciones cuánticas por satélite. Esta técnica requiere un intercambio muy preciso de fotones entre la Tierra y el espacio, lo que también exige contrarrestar la distorsión causada por la atmósfera.

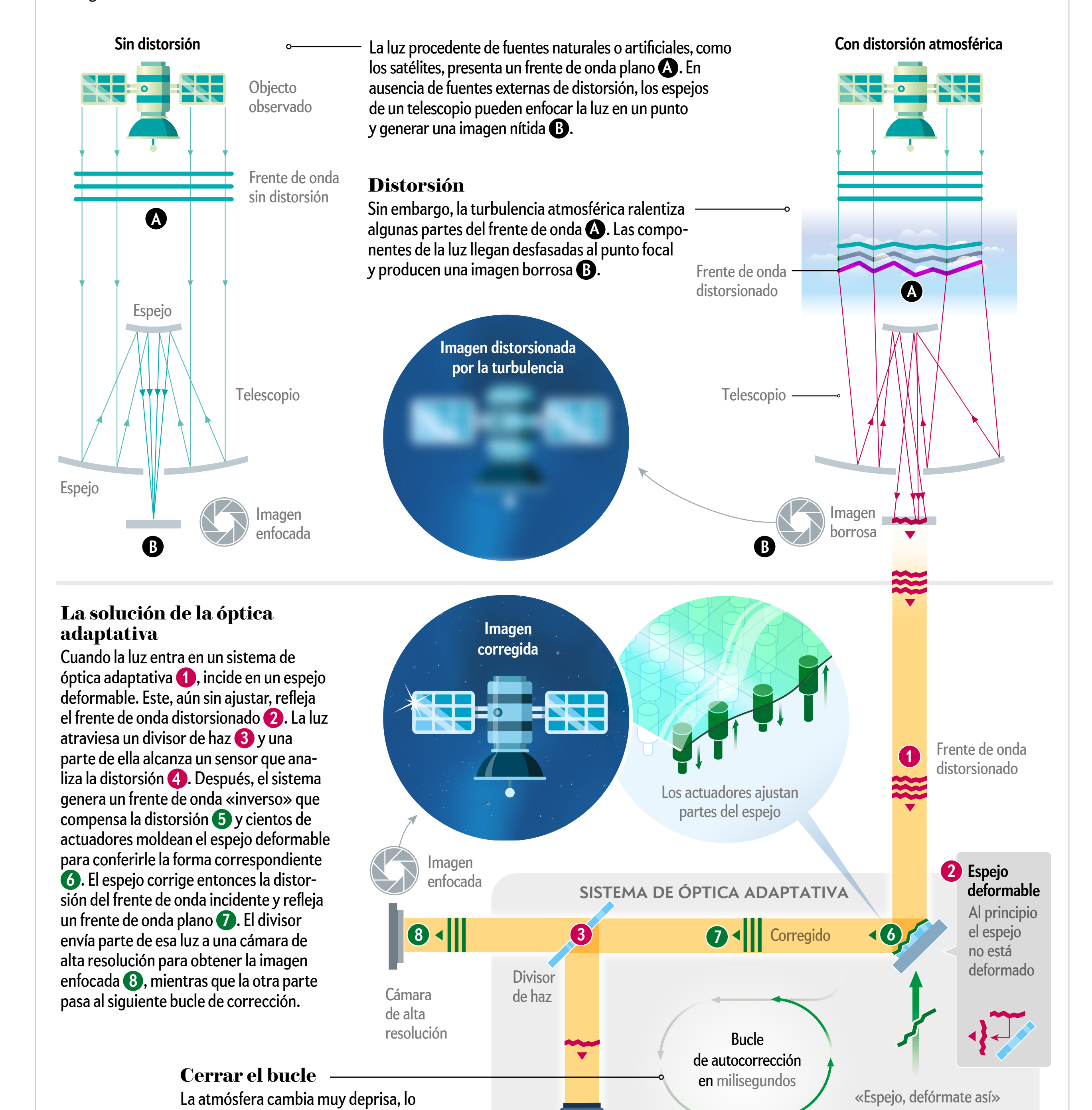
Cómo corregir la distorsión atmosférica

La atmósfera distorsiona las imágenes que captan los telescopios terrestres. Para compensar ese efecto, hace años que los astrónomos usan sistemas de óptica adaptativa. Estos emplean espejos deformables que eliminan las aberraciones y producen imágenes más nítidas.

La luz procedente de fuentes naturales o artificiales, como los satélites, presenta un frente de onda plano A. En ausencia de fuentes externas de distorsión, los espejos de un telescopio pueden enfocar la luz en un punto y generar una imagen nítida B.

Distorsión

Sin embargo, la turbulencia atmosférica ralentiza algunas partes del frente de onda A. Las componentes de la luz llegan desfasadas al punto focal y producen una imagen borrosa B.



La solución de la óptica adaptativa

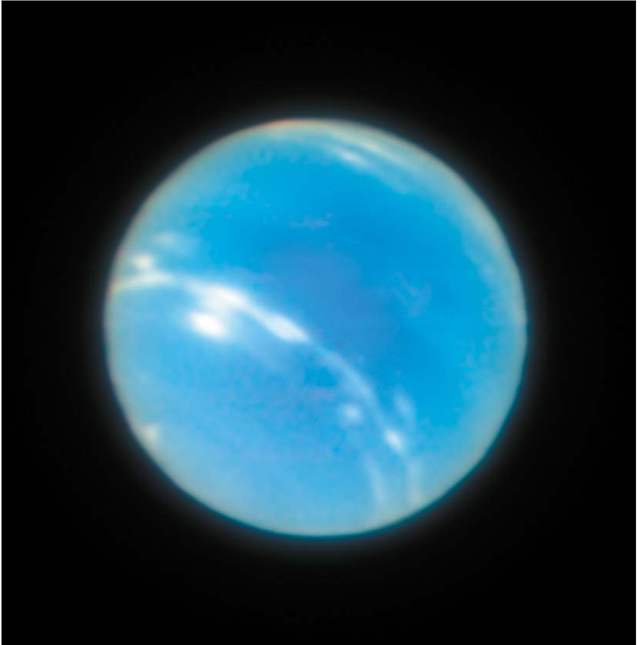
Cuando la luz entra en un sistema de óptica adaptativa 1, incide en un espejo deformable. Este, aún sin ajustar, refleja el frente de onda distorsionado 2. La luz atraviesa un divisor de haz 3 y una parte de ella alcanza un sensor que analiza la distorsión 4. Después, el sistema genera un frente de onda «inverso» que compensa la distorsión 5 y cientos de actuadores moldean el espejo deformable para conferirle la forma correspondiente 6. El espejo corrige entonces la distorsión del frente de onda incidente y refleja un frente de onda plano 7. El divisor envía parte de esa luz a una cámara de alta resolución para obtener la imagen enfocada 8, mientras que la otra parte pasa al siguiente bucle de corrección.

Cerrar el bucle

La atmósfera cambia muy deprisa, lo que obliga a modificar el sistema cerca de una vez por milisegundo. La óptica adaptativa establece un bucle autocorrector, donde el sensor del frente de onda mide cualquier nueva distorsión y envía instrucciones al espejo deformable para compensarla en tiempo real.

5W INFOGRAPHICS





DOS IMÁGENES DE NEPTUNO obtenidas por el Telescopio Muy Grande, en Chile, antes y después de conectar el sistema de óptica adaptativa.

P. WEILBACHER/INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE POTSDAM Y OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL (ESO)

al observarla a través de un telescopio terrestre. Cuanto más turbulenta sea la atmósfera, peor será la calidad de imagen. En un buen emplazamiento, como una montaña elevada y con poca turbulencia, este parámetro suele hallarse entre 0,5 y 1 segundos de arco, lo que significa que la resolución de cualquier telescopio quedará necesariamente limitada a ese intervalo.

El problema reside en que los instrumentos modernos tienen el potencial de alcanzar una resolución mucho mayor. Desde un punto de vista estrictamente óptico, la resolución de un telescopio viene dictada por el llamado «límite de difracción», el cual es proporcional a la longitud de onda de la luz captada e inversamente proporcional al diámetro del telescopio. Las longitudes de onda que observamos solo dependen de la composición química de nuestros cuerpos celestes, de modo que no es posible modificarlas. Así pues, la única manera de construir telescopios capaces de distinguir objetos cada vez menores consiste en aumentar el diámetro del instrumento. Por ejemplo, un telescopio con un espejo de 2 metros puede resolver objetos de 0,05 segundos de arco (el ángulo que subtiende una moneda grande a 100 kilómetros de distancia) en las longitudes de onda propias de la luz visible. Pero, incluso en un enclave óptimo y con una gran calidad de imagen, esta resolución se verá degradada en un factor de 10.

Lo anterior explica por qué resulta tan atractivo enviar telescopios al espacio. Sin embargo, sigue habiendo muy buenas razones para construir nuestros instrumentos en tierra. Los telescopios espaciales no pueden ser demasiado grandes, ya que entonces los cohetes no podrían transportarlos. Además, resulta muy difícil enviar astronautas para su mantenimiento y mejora. El mayor telescopio espacial que se está construyendo en la actualidad es el James Webb, cuyo espejo primario mide 6,5 metros de diámetro. Pero sobre la superficie terrestre ya contamos con telescopios de más de 10 metros. Y el Telescopio Extremadamente Grande, ahora en fase de construcción, tendrá un espejo primario de 39 metros. Los telescopios terrestres pueden también modernizarse a lo largo de su vida útil, ya que siempre es posible poner a su disposición la última generación de instrumentos. No obstante, si queremos aprovechar al máximo estos observatorios, estamos obligados a eliminar la distorsión causada por la atmósfera.

Las primeras ideas de óptica adaptativa se plantearon en los años cincuenta del siglo pasado, y el Ejército estadounidense las usó por primera vez en los años setenta para obtener imágenes de satélites. Los astrónomos tuvieron que esperar hasta la década de los noventa, cuando la técnica alcanzó el grado de madurez necesario para emplearla en los observatorios.

La óptica adaptativa se basa en tres componentes clave. El primero es un sensor de frente de onda: una rápida cámara digital equipada con un conjunto de elementos ópticos para determinar la forma distorsionada de las ondas de luz que llegan al telescopio. Este sensor mide en tiempo real la distorsión causada por la turbulencia atmosférica. Dado que las mediciones deben responder a los rápidos cambios en la atmósfera, tales determinaciones deben repetirse varios cientos o miles de veces por segundo. Pero, para poder captar suficientes fotones con esas exposiciones tan cortas, el sensor de frente de onda necesita una fuente de luz intensa situada más allá de la atmósfera. Las estrellas casi nunca son lo bastante brillantes para este propósito, pero los astrónomos son ingeniosos: crean sus propios astros artificiales enviando haces láser al cielo.

Esa fuente luminosa de referencia, la estrella guía láser, constituye el segundo componente básico del sistema de óptica adaptativa. A unos 90 kilómetros de altitud, muy por encima de la turbulencia que causa las distorsiones, la atmósfera terrestre posee una capa de átomos de sodio, los cuales pueden excitarse con un láser especialmente ajustado para ello. Los átomos de sodio absorben luz láser de color naranja brillante (el mismo tono que observamos en las farolas de sodio de muchas ciudades) y luego la reemiten, lo que genera una brillante estrella artificial. El láser está acoplado al lateral del telescopio

y sigue sus movimientos, de modo que el sensor de frente de onda siempre puede ver ese astro ficticio.

Una vez que podemos registrar de manera continua la forma del frente de onda, deben corregirse sus aberraciones. De eso se ocupa el tercer componente: un espejo deformable. Este consta de una fina membrana reflectante bajo la cual hay una matriz de actuadores, mecanismos que empujan la membrana y tiran de ella para cambiar la forma de la luz reflejada. Cada vez que el sensor de frente de onda efectúa una medición, envía esa información al espejo, el cual se deforma de tal manera que compensa las distorsiones de la luz incidente y elimina las aberraciones causadas por la atmósfera. Esta última cambia tan rápido que las correcciones han de ejecutarse aproximadamente cada milisegundo, lo que supone todo un reto mecánico y computacional. El mecanismo del espejo deformable debe ser capaz de realizar miles de movimientos por segundo y ha de estar conectado a un ordenador y a un sensor de frente de onda que logren operar a esa velocidad. Puede haber hasta varios miles de actuadores, cada uno de los cuales desplaza la superficie del espejo deformable unas pocas micras. Mantener este proceso de actualización constante de manera que se corrija a sí mismo es lo que denominamos «cerrar el bucle».

Aunque la técnica es compleja, hoy los astrónomos ya la dominan en gran medida y todos los grandes telescopios ópticos están equipados con estos sistemas. Incluso hay versiones especializadas concebidas para distintos tipos de observaciones. La óptica adaptativa «clásica» utiliza solo una estrella guía y un espejo deformable, lo que permite corregir la turbulencia atmosférica en una región del cielo bastante reducida. Pero otros sistemas, como los de óptica adaptativa multiconjugada, emplean múltiples estrellas guía y varios espejos deformables. Esta estrategia permite efectuar observaciones astronómicas libres de efectos atmosféricos en áreas entre 10 y 20 veces mayores, aunque a un precio mucho mayor. En otras situaciones, como cuando se desea estudiar un único objeto, como un exoplaneta, lo importante no es el tamaño del campo de visión, sino que la resolución de la imagen sea casi perfecta. En tal caso, los sistemas de óptica adaptativa «extrema» emplean sensores de frente de onda y espejos más rápidos y de mayor resolución, por lo general acoplados a un filtro que bloquea la luz de la estrella anfitriona y que permite obtener imágenes de los tenues planetas que orbitan a su alrededor. En la actualidad, hemos llegado a un punto en que no resulta descabellado esperar que todos los telescopios acaben disponiendo de su propio sistema de óptica adaptativa. Tanto es así que hemos comenzado a extender el uso de esta técnica más allá de la astronomía.

EL PROBLEMA DE LA BASURA ESPACIAL

Irónicamente, una de esas nuevas aplicaciones es la misma que, en su día, impulsó el nacimiento de la óptica adaptativa: observar objetos que orbitan cerca de nuestro planeta. Esta área de investigación, comúnmente llamada «conocimiento del medio espacial», comprende la observación y el estudio de objetos artificiales (satélites) y naturales (meteoroides). Un temor justificado es que el creciente número de lanzamientos de naves espaciales conlleve un aumento de las colisiones entre ellas, lo que generaría aún más basura espacial. En el peor de los casos, tendría lugar un efecto cascada que inutilizaría por completo ciertas órbitas. Este desenlace catastrófico no es improbable y se denomina «síndrome de Kessler», en honor a Donald J. Kessler, el científico de la NASA que la pronosticó ya en 1978.

Ahora mismo giran alrededor de la Tierra unos 34.000 objetos artificiales de más de 10 centímetros, solo un 10 por ciento de los cuales son satélites activos. La basura espacial se amontona en las altitudes más usadas para las actividades humanas en el espacio, sobre todo en las órbitas terrestres bajas (a entre 300 y 2000 kilómetros del suelo) y en la órbita geoestacionaria (a unos 36.000 kilómetros). Aunque los objetos de mayor tamaño pueden rastrearse con radares, con telescopios ópticos y con estaciones de seguimiento por láser, hay varios cientos de miles de residuos de entre 1 y 10 centímetros, así como otros 100 millones menores de un centímetro, cuyas posiciones son básicamente desconocidas.

Las terribles escenas de colisiones en la película de 2013 *Gravity* ilustran lo que sucedería si un gran trozo de chatarra chocara, por ejemplo, con la Estación Espacial Internacional. Según la NASA, en los últimos veinte años la estación se ha visto obligada a realizar cerca de una maniobra evasiva al año para esquivar residuos espaciales que volaban demasiado cerca. Y la tendencia va en aumento, puesto que en 2020 tuvo que hacer tres. La basura espacial podría perturbar de forma significativa nuestro modo de vida actual, ya que, por más que a menudo no nos demos cuenta, este depende en gran medida de la tecnología espacial. Por supuesto, los satélites son necesarios para que funcionen los teléfonos móviles, la televisión e Internet. Pero también para el posicionamiento global, las operaciones bancarias, la previsión meteorológica, las respuestas de emergencia a catástrofes naturales, el transporte y muchas otras actividades cotidianas.

Existen varios proyectos que aspiran a limpiar el espacio, pero son caros y complejos desde un punto de vista técnico y político. Entretanto, algunos científicos, como los de nuestro grupo de la Universidad Nacional de Australia, tratan de desarrollar estrategias de mitigación desde la superficie. Trabajar desde la Tierra resulta más fácil y asequible, y podemos basarnos en técnicas que ya dominamos, como la óptica adaptativa.

Hay varias diferencias sutiles entre nuestra manera de usar la óptica adaptativa en astronomía y el modo en que la aplicamos al conocimiento del medio espacial. La velocidad de los satélites depende de su distancia a la Tierra. Por ejemplo, la Estación Espacial Internacional, que se encuentra a una altitud de 400 kilómetros, se desplaza al increíble ritmo de 8 kilómetros por segundo y completa una órbita cada hora y media. Así pues, su marcha es mucho más rápida que el movimiento aparente del Sol y las estrellas, que tardan un día en completar una vuelta. Debido a esa velocidad, la turbulencia atmosférica parece cambiar mucho más deprisa cuando los telescopios siguen un satélite, y los sistemas de óptica adaptativa han de hacer correcciones entre 10 y 20 veces más rápido que cuando observan un objeto astronómico. También hay que apuntar el láser de la estrella guía un poco por delante del satélite, a fin de explorar la atmósfera en la que se hallará unos milisegundos más tarde.

La óptica adaptativa puede emplearse para observar y fotografiar satélites y residuos en órbitas terrestres bajas, así como para mejorar el seguimiento de objetos en órbitas bajas, medias y geoestacionarias. Una de las técnicas con que rastreamos objetos espaciales es la detección y localización por luz, más conocida como lídar. Para ello, proyectamos en el cielo un láser de seguimiento —que no debe confundirse con el láser de la estrella guía— para que se refleje en el satélite y medimos el tiempo que tarda en regresar, lo que permite determinar con precisión la distancia entre la nave y la Tierra. En este caso, el sistema de óptica adaptativa prepara el rayo láser y distor-

siona a propósito su luz antes de que atraviese la atmósfera. Esa distorsión se calcula para contrarrestar los efectos de la turbulencia, de modo que el rayo láser salga inalterado al abandonar la atmósfera.

Más allá del seguimiento de la basura espacial, confiamos en que esta técnica nos sirva para desviar objetos de su trayectoria si se encaminan a una colisión. La pequeña presión que ejercen los fotones del láser al reflejarse en la superficie de los residuos podría modificar la órbita de un objeto con una relación superficie/masa elevada. Para que esto surta efecto, necesitamos la óptica adaptativa a fin de enfocar el rayo láser justo donde deseamos. Esta estrategia no reduciría la cantidad de desechos en órbita, pero podría ayudar a prevenir los choques entre ellos y a retrasar la llegada del catastrófico síndrome de Kessler. Con el tiempo, estos sistemas podrían emplearse en todo el mundo para tener controlado el entorno espacial.

TRANSMISIONES CUÁNTICAS

La seguridad espacial no es la única aplicación que puede sacar provecho de la óptica adaptativa. Las comunicaciones cifradas son esenciales en multitud de los avances técnicos que hemos presenciado en las últimas décadas: los sistemas de pago desde teléfonos móviles y relojes, la banca en línea y el comercio electrónico dependen de comunicaciones seguras de alta velocidad. La encriptación empleada en esas transmisiones se basa en problemas matemáticos difíciles de resolver, y solo funciona porque los ordenadores actuales no pueden solucionarlos lo bastante rápido. Sin embargo, puede que los ordenadores cuánticos consigan resolver pronto tales problemas más deprisa que sus homólogos clásicos, lo que supondría una amenaza para la encriptación tradicional. Los criptógrafos no dejan de concebir nuevas técnicas para proteger los datos, pero hasta ahora nadie ha logrado crear un protocolo de cifrado completamente seguro. La criptografía cuántica busca cambiar esa situación.

Estos sistemas se basan en las propiedades cuánticas de la luz y su piedra angular es lo que se conoce como una «clave cuántica». Los dispositivos cuánticos son capaces de suministrar una cantidad ilimitada de números verdaderamente aleatorios. Ello permite crear claves inquebrantables que puedan remplazar a las clásicas, las cuales se obtienen de forma predecible y, por tanto, descifrable. En cambio, las claves cuánticas pueden generarse muy deprisa y, si solo se usan una vez, es posible demostrar que proporcionan un cifrado imposible de romper.

Para enviar una comunicación con cifrado cuántico a grandes distancias sin una conexión de fibra óptica, es necesario transmitir luz láser desde un telescopio óptico en la superficie hasta un telescopio receptor en un satélite, y a la inversa. El problema que conlleva enviar estas señales es el mismo al que nos enfrentamos cuando usamos un láser para empujar un trozo de chatarra espacial: que la atmósfera cambia la trayectoria de la transmisión. No obstante, podemos emplear las mismas técnicas de óptica adaptativa para enviar y recibir las señales cuánticas, lo que aumenta en gran medida la cantidad de datos que se pueden transferir.

Esta estrategia podría permitir que las comunicaciones ópticas compitiesen con las grandes antenas de radiofrecuencia usadas en las comunicaciones por satélite, con la ventaja de que serían compatibles con la tecnología cuántica. Es cierto que el desarrollo de estos métodos se enfrenta a otros obstáculos, como la necesidad de almacenar y enrutar la información cuántica sin perturbar el estado cuántico en cuestión. Pero la investigación actual está trabajando de manera activa para solucionar tales problemas, y cabe esperar que tarde o temprano podamos disponer de red global basada en la encriptación cuántica. En tal caso, la óptica adaptativa será crucial para materializar ese sueño.

EL CIELO COMO RECURSO COMÚN

En pocos años, una técnica que antaño estuvo reservada al estudio del firmamento se ha convertido en una que puede ayudarnos a alcanzar algunas de las grandes metas del futuro: preservar la seguridad del espacio y de las comunicaciones. A su vez, estas nuevas aplicaciones impulsarán la óptica adaptativa, lo que también redundará en beneficio de la astronomía.

En el pasado, la óptica adaptativa solo era viable en los grandes observatorios, donde los resultados justificaban el coste. Pero la vigilancia del espacio y las comunicaciones han demostrado que pueden sacar un enorme partido de la óptica adaptativa incluso con aperturas modestas. Nos hallamos en una situación en la que todos los colectivos implicados pueden ayudarse entre sí. Los telescopios con poca demanda podrían renacer una vez equipados con sistemas de óptica adaptativa. Y quienes vigilan la basura espacial ansían un mayor acceso a los telescopios para cubrir el mayor número posible de latitudes y longitudes. De cara a futuros observatorios, los astrónomos se están planteando añadir a sus instrumentos requisitos técnicos que los hagan compatibles con otras aplicaciones, como el conocimiento del medio espacial y las comunicaciones. Eso no solo reforzaría su justificación científica, sino que les daría acceso a nuevas fuentes de financiación, como las de las empresas privadas.

Estamos entrando en una era multidisciplinar en la que el cielo constituye un recurso común. A medida que obtenemos imágenes cada vez más nítidas del firmamento, se difuminan los límites entre todas las actividades que emplean un telescopio como herramienta principal. Los científicos e ingenieros que construyen sistemas de óptica adaptativa están ampliando sus círculos de colaboración y situándose en el centro de esta nueva dinámica.

La óptica adaptativa también se emplea cada vez más sin telescopios. Su uso está bastante extendido en imagen médica y oftalmología para corregir las aberraciones que aparecen al tomar imágenes a través de los tejidos vivos y el ojo. También sirve para lograr una focalización óptima en láseres industriales o incluso en láseres militares antimisiles. Nunca ha habido un mejor momento para explorar el potencial de la óptica adaptativa, tanto en el espacio como en la Tierra. IyC

PARA SABER MÁS

Adaptive optics for laser space debris removal. Francis Bennet et al. en *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, vol. 8447, 844744, septiembre de 2012.

Adaptive optics for space debris tracking. Francis Bennet et al. en *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, vol. 9148, 91481F, julio de 2014.

Adaptive quantum optics with spatially entangled photon pairs. Hugo Defienne et al. en *Physical Review Letters*, vol. 121, 233601, diciembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Limpieza electromagnética del espacio. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, junio de 2015.

La privacidad en la era cuántica. Tim Folger en *IyC*, julio de 2016.

El mayor ojo del planeta. Xavier Barcons, Juan Carlos González Herrera y Agustín Sánchez Lavega en *IyC*, octubre de 2019.

TEMAS

Monografías sobre los retos actuales de la ciencia























Para más información y efectuar tu pedido: Tlf. 935 952 368 | contacto@investigacionyciencia.es

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.



Cómo crear grandes campos magnéticos

Generar campos permanentes y muy intensos no resulta fácil. Los récords actuales no superan los 50 teslas. ¿Cómo se alcanzan esos valores?

La producción de campos magnéticos muy intensos supone todo un reto, tanto en investigación básica, para explorar las propiedades de la materia, como en medicina, para aumentar la resolución de las imágenes por resonancia magnética. Y es que el campo en la superficie de los mejores imanes permanentes llega solo a unos cuantos teslas (unas 30.000 veces el campo magnético terrestre), un valor modesto y, además, limitado a volúmenes pequeños.

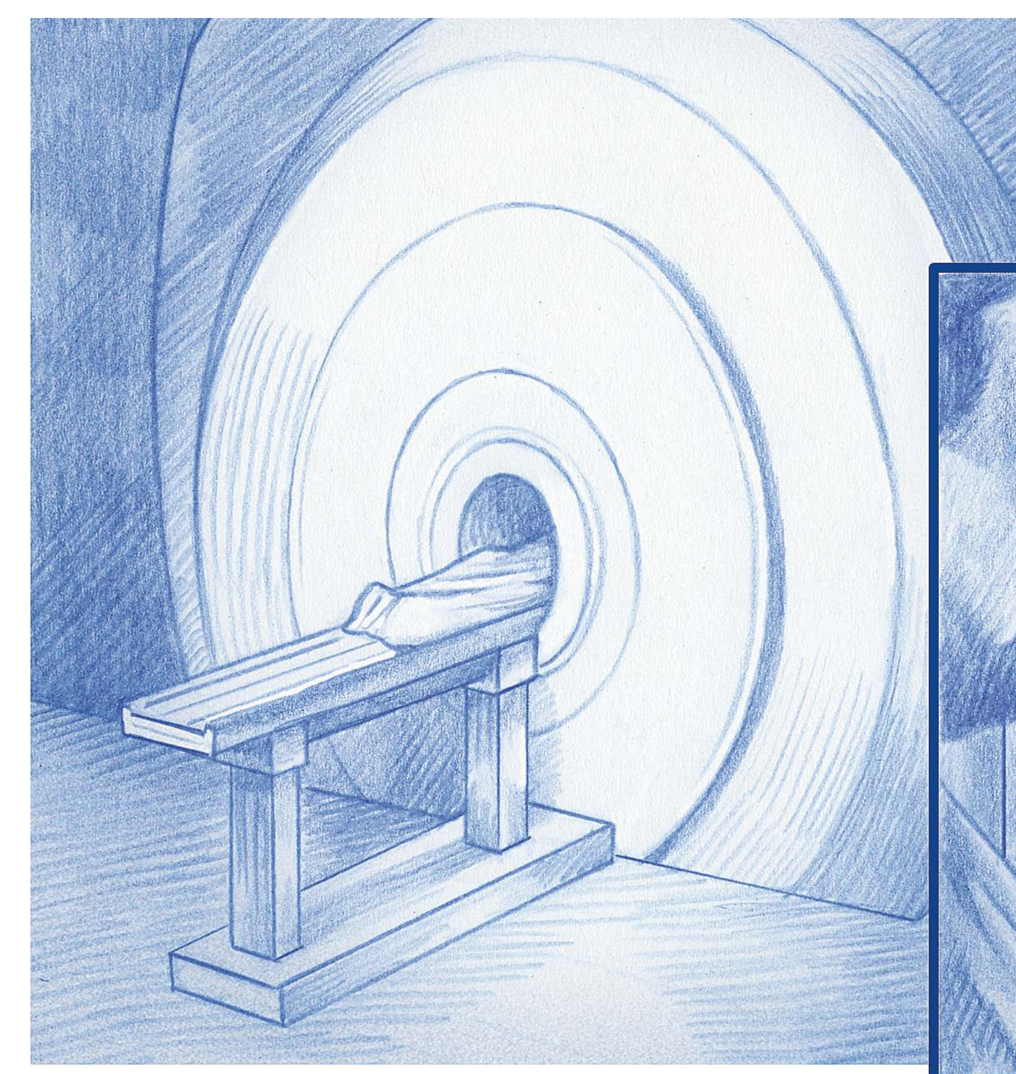
Para obtener campos más intensos y extensos, podemos recurrir a los electroimanes presentes en numerosas aplicaciones de la vida cotidiana, como los motores eléctricos o las cerraduras de algunas puertas. Pero si buscamos campos de varias decenas de teslas, comienzan a surgir los obstáculos. ¿Cuáles son y cómo podemos superarlos?

Corrientes y campos

Veamos primero cómo funciona un electroimán. Toda corriente eléctrica crea un campo magnético en sus proximidades, pero este es muy débil aun en el caso de corrientes intensas: para alcanzar una milésima de tesla, hay que situarse a 2 centímetros de un conductor por donde circulen 100 amperios.

A fin de conseguir campos más grandes, se arrolla el hilo conductor sobre un cilindro para formar un solenoide. El campo magnético resultante no solo es mayor que el de un conductor recto, sino que también es casi uniforme en el interior de la bobina. El campo central es proporcional a la corriente y al número de espiras por unidad de longitud del solenoide. Con 10 amperios y 20.000 vueltas de hilo por metro ya se alcanzan 0,25 teslas. Así pues, ¿basta con aumentar la intensidad de la corriente y la densidad de espiras (es decir, con construir bobinas enormes) para obtener campos tan grandes como queramos?

Enseguida nos topamos con dos problemas. El primero es el efecto Joule, es decir, la disipación de calor causada por la resistencia eléctrica del conductor. Supongamos que la bobina del párrafo anterior mide 10 centímetros de largo y de diámetro, y está formada por un hilo de cobre de 1 milímetro cuadrado de sección. Con una corriente de 40 amperios generaríamos un



campo de 1 tesla, pero la potencia disipada sería de unos 16 kilovatios y el dispositivo no tardaría en fundirse. Y es inútil tratar de reducir ese valor aumentando el diámetro del hilo, como se hace en los alargadores de los electrodomésticos: para preservar el volumen del solenoide habría que reducir el número de espiras; eso obligaría a aumentar la corriente y, al final, la potencia disipada sería similar.

Pero aún hay más. Un hilo recorrido por una corriente eléctrica e inmerso en un campo magnético sufre una fuerza, a veces llamada de Laplace. Como consecuencia, las espiras de una bobina tienden a expandirse en la dirección radial, sometidas a una presión proporcional al cuadrado de la corriente y que en el último ejemplo considerado sería de varias atmósferas. Dada la potencia disipada y las solicitaciones mecánicas, los solenoides no parecen idóneos para crear campos magnéticos muy intensos.

Una solución que se adopta a veces pasa por aceptar la destrucción de la bobina. A ese precio se consiguen campos de hasta 300 teslas. Y si estamos dispuestos a destrozar el experimento entero, podemos «comprimir» el flujo magnético con explosivos para obtener casi 2000 teslas durante unas decenas de microsegundos. Pero dejemos a un lado estos recursos tan extremos y centrémonos en la producción de grandes campos permanentes.

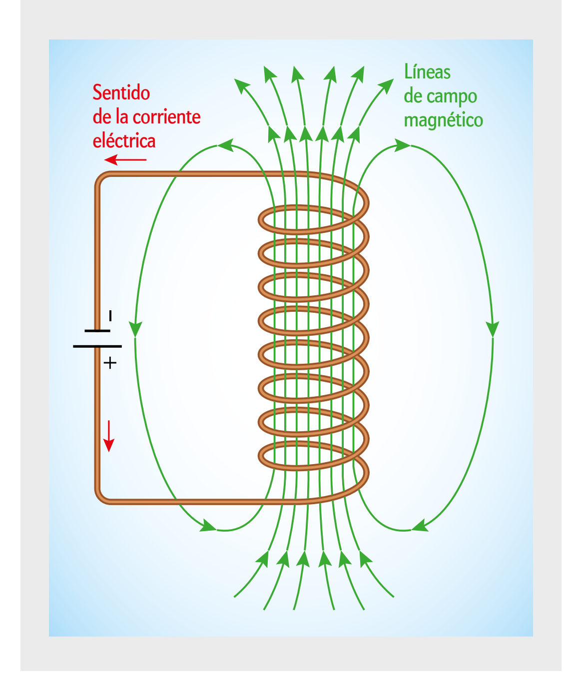
Discos en vez de espiras

En 1933, el físico estadounidense Francis Bitter propuso emplear una sucesión de discos conductores perforados, separados por otros aislantes. Los discos se recortan de tal modo que la corriente se ve obligada a circular en espiral, como en un solenoide, y eso genera un campo magnético a lo largo del eje.

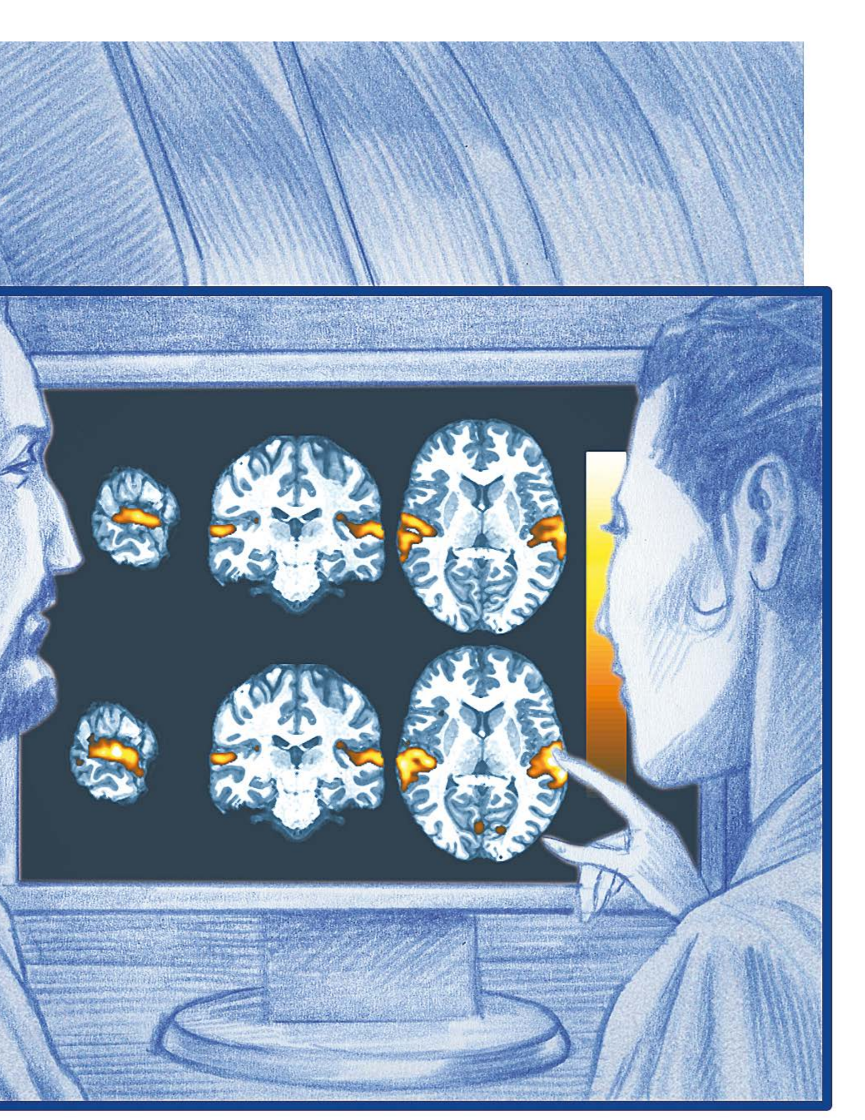
Gracias al uso de un material masivo, el dispositivo soporta mejor las fuerzas mecánicas. Además, se puede refrigerar de forma eficaz enviando agua a través de los orificios de los discos. El Laboratorio Nacional de Grandes Campos Magnéticos de EE.UU. emplea este método para obtener campos de 35 teslas (e incluso de 41 teslas) en una región cilíndrica de unos 3 centímetros de diámetro. Para ello, hacen circular 40.000 amperios a 500 voltios (¡20 megavatios de potencia eléctrica!) y hasta 15.000 litros de agua por

EL FUNDAMENTO DEL ELECTROIMÁN

CUALQUIER CORRIENTE ELÉCTRICA genera un campo magnético. Para un hilo conductor rectilíneo, ese campo (que es proporcional a la intensidad de la corriente) es pequeño y decrece con la inversa de la distancia al hilo. Si enrollamos este alrededor de un cilindro para crear un solenoide, el campo magnético producido en su interior es mucho más intenso, puesto que es proporcional al número de espiras de conductor por unidad de longitud. Además, dentro de la bobina el campo es relativamente uniforme.



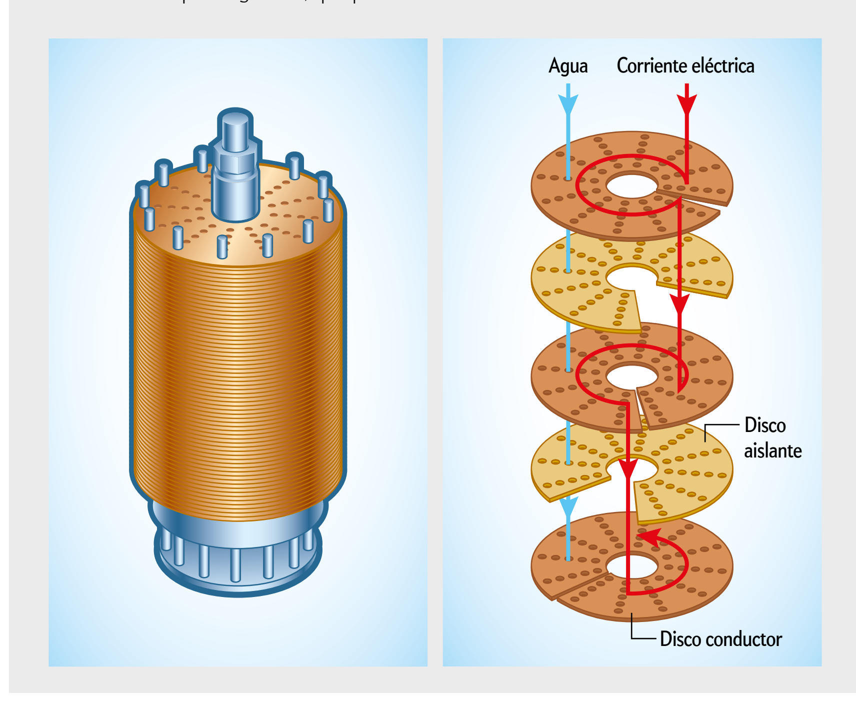
BRUNO VACARO



NEUROSPIN, un centro de investigación en neuroimagen por resonancia magnética situado al sur de París, posee un electroimán superconductor capaz de alcanzar 11,7 teslas, uno de los más potentes para este tipo de aplicaciones.

ELECTROIMANES DE BITTER

LOS ELECTROIMANES DE BITTER están formados por una sucesión de discos conductores y aislantes alternados. Los discos presentan cortes y están dispuestos de tal modo que la corriente que circula por todo el material conductor describe una trayectoria helicoidal, como en un solenoide. Además, los discos poseen numerosos orificios por los que circula agua, lo que asegura una refrigeración eficaz. El uso de un conductor masivo permite el paso de una corriente muy intensa y ofrece una gran resistencia a las fuerzas mecánicas asociadas al campo magnético, que puede así alcanzar valores récord.



minuto. Estas cifras explican por qué no es evidente que vayan a construirse electroimanes de Bitter mucho más grandes.

Superconductores al rescate

Otra opción para conseguir campos intensos es recurrir a los materiales superconductores, cuya resistencia eléctrica desaparece a temperaturas suficientemente bajas. Sin resistencia no hay efecto Joule, y se precisa muy poca alimentación eléctrica. Así, los 9000 electroimanes del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, que generan un campo de 8 teslas, están hechos de una aleación superconductora de niobio y titanio. Por desgracia, esta solución también está sujeta a fuertes restricciones, ya que la superconductividad se pierde si el material está inmerso en un campo magnético demasiado alto: para la aleación de niobio y titanio (a su temperatura de refrigeración en el LHC) el campo máximo es de 9 teslas.

De ahí surge la idea de construir electroimanes híbridos, con un electroimán externo superconductor y uno interno «resistivo». De este modo, el campo magnético en la periferia del dispositivo no es lo bastante alto para que el electroimán externo deje de ser superconductor, mientras que en el centro se suman los campos de los dos imanes. Hoy en día, esta configuración permite alcanzar 45 teslas, pero a costa de un elevado consumo energético.

Varios equipos en el mundo tratan de crear dispositivos basados por completo en superconductores. Para ello emplean materiales como los cupratos, que conservan la superconductividad a temperaturas más altas y en campos de algunas decenas de teslas. Además, soportan corrientes muy intensas, de más de 1000 amperios en el caso de un hilo de ReBCO (óxido de cobre, bario y tierra rara) con una sección de 1 milímetro cuadrado.

Por razones de fabricación y de resistencia mecánica, esos materiales se preparan en forma de capas de 1 micra de espesor, depositadas sobre una cinta aislante de decenas de micras de grueso y centímetros de largo. Los imanes se construyen apilando varios discos de cinta enrollada sobre sí misma.

Aislar con metal

Aún resta una dificultad: para campos muy intensos, el menor incidente puede hacer que el material pierda la superconductividad a nivel local, con lo que reaparece el efecto Joule y el calentamiento. La desaparición de la superconductividad se va extendiendo poco a poco, y todo el circuito corre el riesgo de sufrir daños debido al calor.

Para remediarlo, los físicos del Laboratorio Nacional de Campos Magnéticos Intensos de Grenoble decidieron introducir un aislante entre los rollos de cinta. Y a tal fin emplearon... un metal. Cuando todo funciona bien, la corriente prefiere circular por el superconductor (que carece de resistencia eléctrica) y el metal, pese a su baja resistencia, actúa como un aislante. Pero si se produce un incidente, la corriente bloqueada por la pérdida de la superconductividad recorre el metal a lo largo de todo el perímetro de la bobina. El calentamiento ya no es local, sino que se reparte por todo el disco, con lo que es mucho más suave y no daña el dispositivo.

Durante unas pruebas realizadas en 2019 en Grenoble, una bobina superconductora bautizada como Nougat se introdujo en el interior de un electroimán clásico que ya proporciona 20 teslas, lo que permitió obtener un campo magnético de 32,5 teslas durante varios minutos. Este tipo de experimentos allanan el camino para la generación de campos magnéticos permanentes muy intensos (de entre 30 y 50 teslas) mediante dispositivos totalmente superconductores, compactos y de bajo consumo energético. IyC

PARA SABER MÁS

High magnetic fields for fundamental physics. Rémy Battesti et al. en *Physics Reports*, vols. 765-766, págs. 1-39, noviembre de 2018.

From manufacture to assembly of the 43 T Grenoble hybrid magnet. Pierre Pugnat et al. en *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, n.º 4, art. 4300605, junio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Electroimanes de pulsos. Greg Boebinger, Al Passner y Joze Bevk en *IyC*, agosto de 1995.

Superimanes permanentes. Marc Boada Ferrer en *IyC*, septiembre de 2018.

Un imán superconductor bate un récord mundial. Davide Castelvecchi en www.investigaciónyciencia.es, 18 de junio de 2019.

BRUNO VACARO

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Las leyes del azar y el libre albedrío

Las cadenas de Márkov, uno de los modelos estocásticos más usados en ciencia e ingeniería, fueron fruto del enfrentamiento filosófico entre dos matemáticos

GETTY IMAGES/RA3RN/ISTOCK

La dicotomía entre predestinación y libre albedrío ha sido objeto de debate entre teólogos, filósofos y científicos desde hace siglos. La constatación matemática de que algunos eventos aleatorios, como el lanzamiento de una moneda, presentan estabilidad a largo plazo (es decir, que el resultado promedio de un gran número de observaciones se aproxima a un cierto valor) condujo a una pregunta controvertida: ¿era eso aplicable también a las conductas humanas, aparentemente derivadas del libre albedrío?

En el artículo de este mes, hablaremos de un matemático que intentó dar una respuesta negativa a esa cuestión. Y de otro que, con el ánimo de rebatirla y guiado por una profunda animadversión hacia su colega, creó un célebre y provechoso modelo estocástico.

Teoremas de estabilidad

A principios del siglo XVIII, la ley de los grandes números, demostrada por Jacob Bernoulli (1654-1705), se publicó en una obra póstuma de título sugerente: *Ars conjectandi* («El arte de la conjetura»). Bernoulli propuso estimar la probabilidad desconocida de un evento a partir de la frecuencia con que este se producía en un gran número de ensayos independientes, y demostró que esa estimación se acercaba más y más al valor real a medida que aumentaba el número de ensayos.

La ley de los grandes números nos permite, por ejemplo, usar el método de Montecarlo para computar el número π con precisión arbitraria. Basta con inscribir un círculo en un cuadrado y observar que el cociente entre sus áreas es $\pi/4$. Así que, si lanzamos sobre la superficie del cuadrado n puntos al azar y multiplicamos por cuatro la proporción de los que caen en el círculo, obtendremos una aproximación a π que irá mejorando conforme crece n.

Bernoulli formalizó matemáticamente una idea que ya había insinuado Gerolamo Cardano (1501–1576) en el Renacimiento: es posible determinar si una moneda es justa o no lanzándola al aire muchas veces. Podemos registrar el resultado del primer lanzamiento mediante una variable aleatoria X_1, a la que asignaremos el valor 1 si sale cara y 0 si sale cruz. De igual modo, X_2 valdrá 1 si sale cara en el segundo lanzamiento y 0 si sale cruz, y así sucesivamente. Por lo tanto,

$$Y = X_1 + X_2 + \cdots + X_n$$

será el número total de caras en n lanzamientos. Bernoulli demostró que Y/n, la proporción de caras en n lanzamientos, se acerca más y más a la probabilidad de que salga cara en nuestra moneda a medida que aumenta n. Así que, para una moneda justa, Y/n se aproximará a 1/2.

La ley de los grandes números que demostró Bernoulli, hoy denominada ley débil de los grandes números, es un resultado sobre la estabilidad a largo plazo del valor medio de una suma de variables aleatorias con ciertas características. Actualmente, los matemáticos conocen muchos teoremas de estabilidad en el ámbito de la teoría de la probabilidad. Constituyen el orden oculto detrás de lo aleatorio y suelen designarse con el oxímoron «leyes del azar».

Supongamos que lanzamos n veces seguidas una moneda justa y obtenemos una cierta proporción Y/n de caras. Si repetimos muchas veces ese mismo experimento, hallaremos una distribución de probabilidades para Y/n. En la figura 1 vemos esa distribución para los casos n = 10, 20, 30, 40, 60 y 100. Si marcamos en las gráficas las probabilidades comprendidas entre 0,45 y 0,55 con puntos más gruesos, apreciamos claramente la ley de los grandes números: conforme crece n, la distribución de probabilidad se concentra más y más alrededor de 0,5.

El teorema del límite central, otra de las leyes del azar, muestra que esas gráficas se parecen cada vez más a una distribución normal, o gaussiana, a medida que aumenta n. Nos enseña, además, que la fracción de caras Y/n es una cantidad que fluctúa en torno a su valor medio 0,5, y que el tamaño medio de las fluctuaciones decae como $1/\sqrt{n}$. Así, si lanzamos la moneda diez mil veces, dado que $1/\sqrt{10.000} = 0{,}01$, la mayor parte de valores de Y/n se encontrarán entre 0,49 y 0,51. En cambio, si la lanzamos un millón de veces, el tamaño medio de las fluctuaciones será $1/\sqrt{1.000.000} = 0{,}001$ y lo esperable es que Y/n se halle entre 0,499 y 0,501. De manera más formal, el teorema dice que si X_1, X_2, ..., X_n son variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad de media μ y varianza σ^2 finitas, su promedio Y/n, cuando n es muy grande, se distribuirá como una normal de media μ y dispersión $\sigma/\sqrt{n}$.

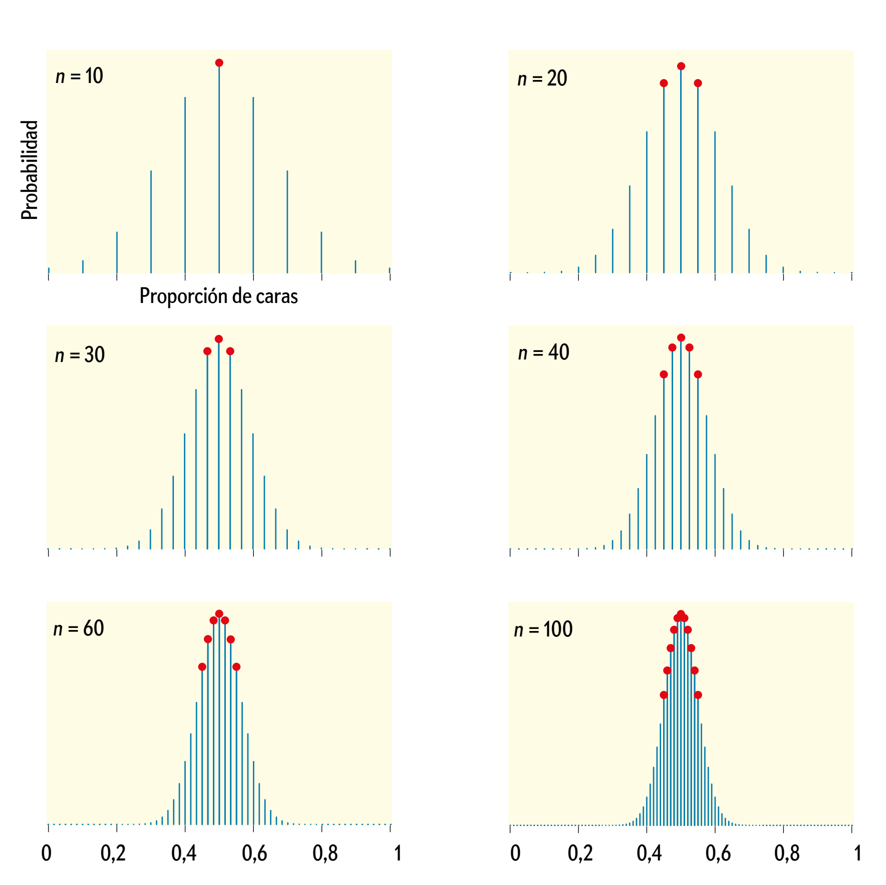
Este resultado es sorprendentemente universal, dado que no depende de cómo sean nuestras variables aleatorias. Pueden tomar solo dos valores 0 y 1 (como en el caso de la moneda), reflejar las tiradas de un dado o adoptar valores distribuidos de manera uniforme entre –100 y 100. Sea como fuere, al sumar muchas de esas cantidades independientes obtendremos una campana de Gauss.

La condición de independencia

Una de las condiciones necesarias para poder aplicar la ley de los grandes números y la ley del límite central, tal y como se conocían a finales del siglo XIX, era la independencia de las variables aleatorias implicadas. (En el caso de una moneda, eso se traduce en que cada lanzamiento es independiente de los anteriores.) Esa independencia entre eventos facilita el cálculo de probabilidades. Por ejemplo, si lanzamos nuestra moneda justa dos veces, la probabilidad de que salgan dos caras es simplemente $1/2 \times 1/2 = 1/4$.

Sin embargo, la condición de independencia se satisface pocas veces. En juegos como la oca o el Monopoly, al lanzar los dados determinamos cuántas casillas debemos avanzar, pero el lugar donde aterrizamos depende de nuestra posición en el tablero. En diferentes momentos de la partida, la misma tirada nos podría llevar de vuelta a la salida o hasta el siguiente puente, en el caso de la oca, y a optar por la compra de una codiciada calle o a la cárcel, en el del Monopoly.

En esos juegos, los eventos se condicionan entre sí de una forma sencilla: el futuro estado solo depende del estado presente, no de los estados pasados. El matemático Andréi Andréevich Márkov (1856-1922) analizó esa sencilla vinculación entre los estados de un sistema. Curiosamente, el motivo por el que se embarcó en ese estudio hacia el final de su



1. DISTRIBUCIONES EXPERIMENTALES para la probabilidad de obtener una determinada proporción de caras al lanzar n veces una moneda justa, con n = 10, 20, 30, 40, 60 y 100. Conforme aumenta el número de lanzamientos, disminuye la dispersión en torno a la media.

ADAPTADO DE «INTRODUCTION TO PROBABILITY», CHARLES M. GRINSTEAD Y J. LAURIE SNELL. THE CHANCE PROJECT, 2006.

carrera no fue académico, sino personal: lo hizo movido por una disputa con otro matemático, Pável Nekrásov (1853-1924), por el que sentía una profunda animadversión. Vale la pena recordar la historia, como ejemplo de argumentación matemática con un trasfondo filosófico.

Márkov frente a Nekrásov

Márkov se formó en la universidad de San Petersburgo, donde permaneció toda su carrera como docente e investigador. Su activismo político le llevó a enfrentarse con la Iglesia ortodoxa rusa, por excomulgar a León Tolstói, y hasta con el zar Nicolás II, por vetar el ingreso de Máximo Gorki a la Academia de Ciencias. Pero su disputa más virulenta la mantuvo con Nekrásov, cuyo trabajo consideraba «un abuso de las matemáticas». Márkov (un antizarista ateo de San Petersburgo) y Nekrásov (un zarista religioso de Moscú) eran antagónicos. Su litigio comenzó cuando el segundo, en un artículo de 1902, introdujo la ley de los grandes números en el viejo debate teológico sobre el libre albedrío y la predestinación.

Todo empezó a fraguarse en la primera mitad del siglo XIX. El sociólogo y estadístico Adolphe Quetelet (1796-1874) sentó las bases de la «física social», y eso llevó a la comunidad matemática a una intensa discusión alrededor de los motivos por los que se observaba una estabilidad en la distribución de los comportamientos sociales. A Nekrásov, ferviente defensor de la existencia del libre albedrío, le resultaba filosóficamente repugnante que del puro azar emergieran leyes y patrones: no le gustaba la idea de la predestinación ni siquiera en su vertiente estadística.

Nekrásov sostenía que solo los eventos independientes podían converger a distribuciones predecibles, es decir, que la independencia era una condición necesaria para que se cumpliera la ley de los grandes números. Y, según él, los actos voluntarios derivados del libre albedrío no eran eventos independientes que careciesen de vínculos causales. De modo que no era posible justificar los datos recopilados por la sociología, como las estadísticas de suicidios o delincuencia, con teoremas de estabilidad como la mencionada ley.

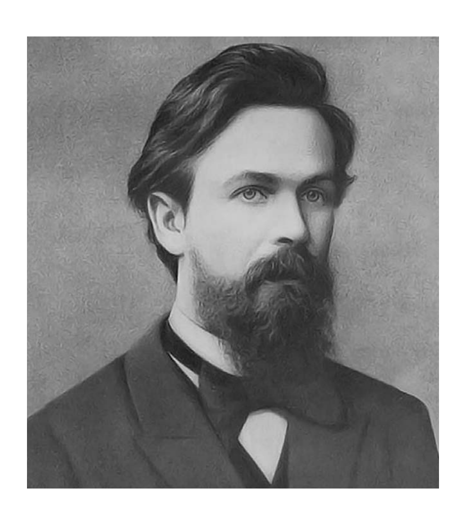
Aunque Márkov contaba ya 50 años y estaba casi jubilado, su pública y notoria antipatía hacia Nekrásov le llevó a explicar en una serie de artículos que «la ley de los grandes números se puede aplicar a variables dependientes», según sus propias palabras. Espoleado por la polémica, alumbró su creación más universal: las cadenas de probabilidades vinculadas. Hoy conocidas como cadenas de Márkov, resultaron ser un modelo estocástico de amplia aplicación que refutaba las tesis de Nekrásov.



PÁVEL NEKRÁSOV (1853-1924)

Márkov abordó por primera vez la cuestión de las variables dependientes y la ley de los grandes números en 1906. Comenzó por el caso más simple, un sistema con solo dos estados, y demostró que la distribución de probabilidad de esos estados se hacía estable a medida que el sistema evolucionaba en el tiempo. En otras palabras, obtuvo un equivalente a la ley de los grandes números para ciertas variables aleatorias no independientes. A partir de ahí, generalizó la demostración para una amplia clase de modelos con variables aleatorias condicionadas, zanjando de una vez por todas la disputa con Nekrásov.

Al principio, la comunidad matemática permaneció impasible y ajena a los nuevos resultados de Márkov. Es probable que esa percepción hubiera cambiado radicalmente si hubiera presentado su teoría acompañada de alguna aplicación práctica, pero Márkov siempre había despreciado la matemática aplicada: «Solo me interesan las preguntas de análisis puro... La aplicabilidad de la teoría de la probabilidad me resulta indiferente».



ANDRÉI MÁRKOV (1856-1922)

Las cadenas de Márkov

Hubo que esperar a 1913 para que Márkov superara su indiferencia por la matemática aplicada y alcanzase el reconocimiento por sus resultados. Lo consiguió gracias al análisis matemático de una obra que, por aquel entonces, recitaban todos los escolares rusos: la novela en verso *Eugenio Oneguin*, de Alexánder Pushkin.

Su estudio proporcionó un ejemplo que satisfacía la ley de los grandes números pese a mostrar dependencia. Obviando los signos de puntuación y espacios en blanco, Márkov generó una secuencia con las primeras 20.000 letras de la obra, una cadena como

QUEBELLOESVIVIR...

Entonces la simplificó, distinguiendo solo entre vocales (V) y consonantes (C) para obtener una cadena similar a

$$CVVCVCCVVCCVCVC\dots,$$

con 8638 vocales y 11.362 consonantes.

Márkov deseaba estimar hasta qué punto el texto de Pushkin violaba el principio de independencia. La probabilidad de que una letra elegida al azar de entre las 20.000 de la cadena fuera una vocal era 8638/20.000 = 0,43. Si las letras adyacentes fuesen independientes, la probabilidad de encontrar dos vocales seguidas (VV) debería ser $0{,}43 \times 0{,}43 = 0{,}19$, y esperaríamos que una muestra de 19.999 pares de letras presentara, en promedio, más de 3700 vocales dobles. Márkov contó el número de pares de vocales consecutivas de la cadena y resultó ser de 1104, menos de un tercio de lo esperado al suponer independencia.

Así que Márkov encontró un fuerte indicio de que las ocurrencias de las vocales y consonantes no eran independientes. Por contra, existía una marcada tendencia a que fueran alternándose. ¿Cómo construir un modelo estocástico capaz de generar secuencias de vocales y consonantes que remedaran estadísticamente la extraída de la novela?

Márkov abordó la cuestión porque ya disponía de tal modelo estocástico: las cadenas de Márkov. Para construir una de esas secuencias, debemos determinar todos los posibles estados de nuestro sistema, así como todas las probabilidades de que tras uno de esos estados se produzca otro, denominadas probabilidades de transición. La cadena de Márkov para la novela era muy sencilla, pues solo tenía dos estados: vocal (V) y consonante (C). Y Márkov ya había calculado las probabilidades de transición al contabilizar las frecuencias de los posibles pares.

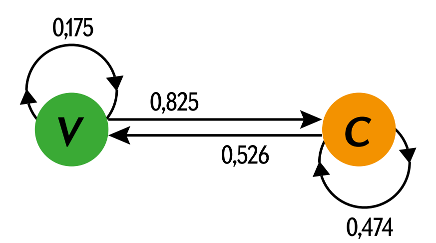
Las cadenas de Márkov se suelen representar mediante un grafo, una red donde los nodos indican los estados, y los enlaces, las posibles transiciones entre ellos. En nuestro ejemplo, el grafo posee dos nodos que denotan las vocales y las consonantes, los dos posibles estados del sistema (*véase la figura 2*).

Los enlaces de la red están dirigidos (son flechas) y muestran la probabilidad de transición entre los nodos que conectan. Así, el enlace que lleva del estado vocal V al consonante C tiene asociada una probabilidad $P(V \to C) = 0{,}825$. Eso significa que, si en un punto de la secuencia tenemos una V, la probabilidad de que a continuación venga una C es 0,825. Y si no es una C, será una V, así que también tenemos un «autoenlace» con probabilidad $P(V \to V) = 0{,}175$, de modo que

$$P(V \to C) + P(V \to V) = 1 .$$

(En cualquier cadena de Márkov, la suma de las probabilidades asociadas a todas las flechas que salen de un nodo es siempre 1, porque la transición contempla todas las opciones.)

Comenzando por una letra cualquiera y aplicando esas probabilidades de transición, podemos generar de manera secuencial una cadena de vocales y consonantes, como $C \to V \to C \to C \to V$..., estadísticamente similar al texto original. Por ejemplo, si partimos de una consonante, estaríamos en el nodo C y el siguiente elemento sería una vocal, con probabilidad $P(C \to V) = 0{,}526$, u otra consonante, con probabilidad $P(C \to C) = 0{,}474$.



2. GRAFO DE UNA CADENA DE MÁRKOV de dos estados (vocal V y consonante C) que permite generar secuencias estadísticamente similares a la que extrajo Andréi Márkov de la novela *Eugenio Oneguin*. Los números indican las probabilidades de transición.

La cadena de Márkov de dos estados

Analicemos de manera general la cadena de Márkov más sencilla posible: una secuencia con dos estados, como en nuestro ejemplo de las vocales y las consonantes. Definamos el vector de estados

$$\vec{\pi}(t) = (V(t), C(t)) ,$$

donde la componente $V(t)$ indica la probabilidad de que la t-ésima letra sea una vocal, y $C(t)$, de que sea una consonante. Por tanto, el vector de estados representa la distribución de probabilidad de los diferentes estados en el paso t, y sus componentes siempre suman 1.

Supongamos ahora, de modo general, que las probabilidades de transición son

$$\begin{aligned} P(V \to V) &= 1 - \alpha , \\ P(V \to C) &= \alpha , \\ P(C \to V) &= \beta , \\ P(C \to C) &= 1 - \beta . \end{aligned}$$

Podemos reunir esta información en una matriz, conocida como la matriz de transiciones de la cadena de Márkov:

$$M = \begin{pmatrix} 1-\alpha & \alpha \\ \beta & 1-\beta \end{pmatrix} .$$

Lo interesante de esta representación es que, al multiplicar el vector de estados por la matriz de transiciones M, obtenemos un nuevo vector de estados, que da la distribución de probabilidad de los estados en el paso siguiente:

$$\vec{\pi}(t+1) = \vec{\pi}(t) M .$$

Así, la evolución del vector de estados se obtiene multiplicando una y otra vez por la matriz M. En este caso, es fácil demostrar por inducción que M^n, la matriz de transición después de n pasos, vale

$$M^n = \frac{1}{\alpha+\beta} \begin{pmatrix} \beta & \alpha \\ \beta & \alpha \end{pmatrix} + \frac{(1-\alpha-\beta)^n}{\alpha+\beta} \begin{pmatrix} \alpha & -\alpha \\ -\beta & \beta \end{pmatrix} .$$

Observemos que (salvo en el caso trivial $\alpha = \beta = 0$, para el que $M = I$) siempre tenemos $|1-\alpha-\beta| < 1$, y eso garantiza que

$$\lim_{n\to\infty} (1-\alpha-\beta)^n = 0$$

y, por lo tanto,

$$\lim_{n\to\infty} M^n = \frac{1}{\alpha+\beta} \begin{pmatrix} \beta & \alpha \\ \beta & \alpha \end{pmatrix} = M^* .$$

Este fue uno de los primeros resultados que halló Márkov, y es extraordinario porque revela que, a medida que crece n, la matriz de transiciones a n pasos tiende a una matriz de valores constantes M^*.

Pero aún hay más. Tomemos un vector de estados inicial arbitrario

$$\vec{\pi}(0) = (V(0), C(0)) ,$$

con la condición $V(0) + C(0) = 1$. Multiplicar este vector por la matriz M^* equivale a dejar que la cadena de Márkov evolucione una infinidad de pasos de tiempo. El lector puede comprobar que el resultado es

$$\vec{\pi}^* = \left(\frac{\beta}{\alpha+\beta} , \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \right) ,$$

un vector de estados independiente de los valores iniciales $V(0)$ y $C(0)$, tal que

$$\vec{\pi}^* M = \vec{\pi}^* .$$

Por ejemplo, utilizando los valores de la figura 2, tenemos $\vec{\pi}^* = (0{,}39; 0{,}61)$. Eso implica que, a la larga, cabe esperar que el 39 por ciento de las letras de la novela de Pushkin sean vocales, y el 61 por ciento, consonantes.

De esta manera, Márkov explicó cómo la cabra siempre acaba tirando al monte: la cadena termina en el mismo vector estacionario de estados sin importar sus condiciones iniciales, $\vec{\pi}(0) M^* = \vec{\pi}^*$. Y, de paso, creó uno de los modelos estocásticos más usados y fértiles en ciencia e ingeniería. IyC

PARA SABER MÁS

Statistical regularity and free will: L. A. J. Quetelet and P. A. Nekrasov. Eugene Seneta en *International Statistical Review*, vol. 71, págs. 319-334, agosto de 2003.

First links in the Markov chain. Brian Hayes en *American Scientist*, vol. 101, n.º 2, pág. 92, marzo-abril de 2013.

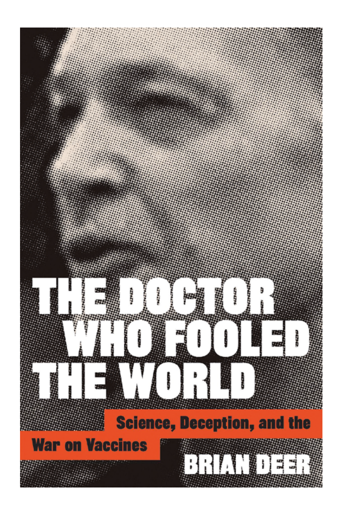
Andrey Andreyevich Markov: A furious mathematician and his chains. Angelo Vulpiani en *Lettera Matematica*, vol. 3, págs. 205-211, diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es equitativo el Monopoly? Ian Stewart en *IyC*, junio de 1996.

La importancia de Dios en la Biblia. Bartolo Luque en *IyC*, julio de 2013.

Leyes universales. Terence Tao en *IyC*, febrero de 2015.



THE DOCTOR WHO FOOLED THE WORLD
SCIENCE, DECEPTION, AND THE WAR ON VACCINES
Brian Deer
Johns Hopkins University Press, 2020
408 págs.

Goldfinger contra las vacunas

Crónica de un colosal fraude científico

Parafraseando a Màrius Carol, quien durante ocho años fuera director de *La Vanguardia*, es pertinente recordar que el periodismo nace del afán de explicar las cosas tal y como sucedieron y de esclarecer por qué pasaron, de la capacidad de rastrear todos los fondos posibles, del escepticismo necesario para mantener un espíritu crítico, y de la honestidad y valentía de quien lo ejerce. Es un oficio complejo que exige llegar al final de las historias sin perderse por el camino y sin sucumbir a presiones o amenazas. Tales cualidades hacen de esta vieja profesión un poder sin trono, razón por la que también es conocida como «cuarto poder». Y todas ellas las encontramos a lo largo de la vida y la obra profesional de Brian Deer, periodista y autor del libro de cabecera.

Cuando Gabriel García Márquez, con años de periodismo a sus espaldas, se refería a sus obras literarias, decía que estas eran, en gran medida, periodismo. Sobre el oficio nos dejó ideas como estas: «La crónica es la novela de la realidad. Es un relato en el que hay que respetar estrictamente la realidad. [...] Es para mí el género, la rama del periodismo que más se acerca a la literatura en cuanto a la forma de recolección de información, de la organización y del ojo que analiza»; o «El reportaje es un género literario. [...] El reportaje es la noticia completa, toda la noticia, de modo que el lector la conozca como si hubiera estado en el lugar de los acontecimientos».

Los editores de *The doctor who fooled the world* lo clasifican en la categoría de periodismo de investigación. Y no cabe duda de que la obra constituye uno de los mejores exponentes de este género. Pero es aún más. Una primera reflexión tras su lectura es que lo que en ella se explica constituye un claro ejemplo del dicho que afirma que la realidad puede llegar a superar a la ficción. Y esto hace que, volviendo a García Márquez, pueda decirse que el libro de Deer es una novela de la realidad y, por tanto, pura literatura y de la mejor. Si no fuera porque lo que nos cuenta se ajusta a los hechos, el libro pasaría por una buena novela con sus intrigas, tramas mafiosas, luchas legales, víctimas, verdugos, perdedores y ganadores. Y de no ser porque Deer nos cuenta la noticia completa colmo si estuviéramos allí, uno diría que la ficción es tan evidente como en una novela o película de James Bond.

> Las víctimas de nuestro Goldfinger particular fueron —y siguen siendo— multitud de niños con y sin problemas de desarrollo neurológico, muchos diagnosticados con autismo

Han leído bien: la obra se me antoja como una novela de James Bond, una cuyo guion cinematográfico podría titularse «Goldfinger contra las vacunas». En él, el papel de villano sería para Andrew Wakefield, quien interpretaría a uno de los Goldfingers más crueles de la saga del 007. Su carácter, extremadamente incapaz de sentir la más mínima vergüenza hasta el punto de que parece no tener consciencia, y su avaricia por la fama y el dinero harían a Wakefield merecedor de este sobrenombre.

Las víctimas de nuestro Goldfinger particular fueron —y siguen siendo— multitud de niños con y sin problemas de desarrollo neurológico, muchos diagnosticados con autismo. De 12 de ellos sabemos que sufrieron procedimientos clínicos muy invasivos: en el curso de una semana de ingreso en el Hospital Royal Free de Londres, estos pequeños, de entre 3 y 10 años de edad, fueron sometidos a un protocolo intenso y cruel de exploraciones que incluían una ileocolonoscopia, análisis de sangre y orina, punción lumbar, resonancia magnética nuclear, radiografías con contraste de bario y encefalograma. En muchos casos los procedimientos se realizaron bajo sedación, y es lógico preguntarse cómo pudieron obtenerse datos clínicos de ellos. El libro de Deer se ocupa de esto y de mucho más, si bien las atrocidades cometidas contra esos niños nunca serán lo suficientemente reveladas por más que se publiquen investigaciones como esta.

Con tales datos clínicos, convenientemente manipulados, Wakefield consiguió publicar en 1998 un artículo en la prestigiosa revista *The Lancet*. Valga decir que Wakefield y el editor de *The Lancet*, Richard Horton, se conocían bien por haber trabajado puerta con puerta en el Hospital Royal Free. Dicho artículo es la piedra de toque de toda la historia que se relata en el libro y, según lo que nos desvela Deer, solo tiene un nombre: fraude científico.

En él, Wakefield proponía y decía demostrar una asociación entre cierta enfermedad gastrointestinal (enterocolitis crónica), desarrollo intelectual regresivo (autismo) y un virus (el del sarampión), el cual habría encontrado su camino de entrada a los niños a través de la vacuna triple vírica. En el fondo, y como demuestra Deer, aquel trabajo estaba dirigido a obtener «pruebas» para poder pleitear contra las multinacionales farmacéuticas una vez se admitiera que dicha vacuna era responsable de efectos neurológicos. Tales estudios fueron urdidos por un complot entre Wakefield y un abogado ambicioso y sin escrúpulos, Richard Barr.

The doctor who fooled the world es el resultado de un trabajo de investigación de más de 13 años que dio lugar a más de dos docenas de reportajes en las prime-

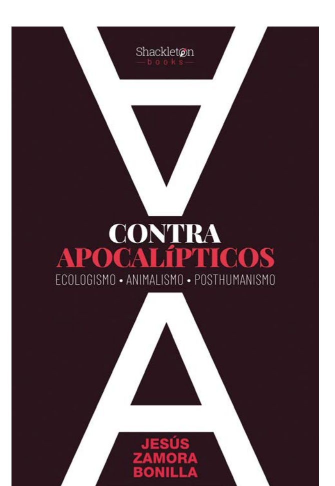
ras páginas del periódico *Sunday Times*, a siete artículos invitados y revisados por pares en la revista de medicina general *British Medical Journal* y al libro que tenemos entre manos. En él, Deer nos cuenta con todo lujo de detalles cómo este colosal fraude científico se gestó a través de una investigación médica falsa, carente de toda ética y en la que las víctimas han sido unos niños y también sus padres, quienes se han sentido culpables de provocar daños irreparables a sus hijos por haberlos vacunado. Aunque, sorprendentemente, muchos de esos padres han abrazado la doctrina de Wakefield y se han erigido en sus más fervientes defensores, con el argumento de que les ha dado una explicación a los graves problemas de salud de sus hijos [*véase* «El autoengaño de los antivacunas», por Sara Pluviano y Sergio Della Sala; Mente y Cerebro, n.º 95, 2019]. Hoy sabemos que el autismo tiene un fuerte componente genético, pero esta explicación no parece ser del interés de los negacionistas de las vacunas.

La guerra llegó a su momento culminante con la expulsión de Wakefield del Hospital Royal Free en octubre 2001, y con la suspensión, en mayo de 2010, de su licencia para practicar medicina en el Reino Unido. Aquel proceso supuso 197 días de presentación de pruebas, testimonios y deliberaciones ante un comité del Consejo Médico General británico, el cual declaró a Wakefield culpable de más de 30 cargos y lo calificó de embaucador, inmoral y cruel.

Sin embargo, nuestro Goldfinger persiste en su lucha, ahora desde Estados Unidos. Allí ha conseguido el apoyo de asociaciones de padres de niños con autismo, de millonarios y de algunos personajes famosos que le han permitido aumentar su fama, su tren de vida y extender sus falsedades por el mundo. Esto último lo ha conseguido a través de las redes sociales y de un documental pseudocientífico estrenado en 2016. Hoy mismo es posible encontrar en Internet numerosas videoconferencias de Wakefield predicando su doctrina antivacunas. Mientras tanto, durante los últimos años, los casos infantiles de sarampión han aumentado en todo el mundo. En definitiva, Goldfinger ha creado un mito urbano que se ha contagiado entre muchos padres como si fuera un virus, a veces letal, llamado negacionismo de las vacunas. Es sabido que los mitos de este tipo resultan muy difíciles de contrarrestar, por más que se publiquen grandes trabajos como el de Deer [*véase* «Contra las teorías conspirativas», por Aleksandra Cichocka; Investigación y Ciencia, mayo de 2021]. Además, la actual pandemia de COVID-19 ha dado nuevas alas a estos negacionistas, al reavivar la controversia sobre las vacunas.

The doctor who fooled the world es un trabajo monumental y absolutamente riguroso en los aspectos científicos, que ha sido elaborado gracias a infinidad de consultas con múltiples especialistas. Dicha información se encuentra explicada en el libro sin tecnicismos, aunque no por ello puede decirse que se trate de una obra de divulgación científica. Una idea del volumen de las fuentes consultadas son los 12.000 documentos indexados, los cerca de 500 vídeos y audios, y las más de 200 copias de documentos de la Biblioteca Británica que se hallan en poder del autor. Más de 2000 de esos documentos han servido para validar la veracidad de lo que se explica en la obra ante los editores y revisores del libro. Además, ha declarado de palabra y por escrito y bajo pena de perjurio ante los tribunales. En definitiva, ante la exhaustiva revisión de los hechos por parte tanto de editores como de la justicia, debemos admitir, sin lugar a dudas, que esta historia se ajusta fielmente a la verdad.

—Gregorio Valencia Parera
Investigador emérito del Instituto de Química Avanzada de Cataluña (CSIC)



CONTRA APOCALÍPTICOS
ECOLOGISMO, ANIMALISMO, POSTHUMANISMO
Jesús Zamora Bonilla
Shackleton Books, 2021
320 págs.

Una dosis de confianza en el futuro

Una enriquecedora crítica contra el ecologismo catastrofista, el animalismo antiespecista y el posthumanismo cultural

Podría decirse que el elemento común de todos los trabajos filosóficos de Jesús Zamora Bonilla, tanto los más técnicos y académicos como los dirigidos a un público más amplio (como es el caso de este libro), es que no solo están siempre alejados de los tópicos, sino que son sumamente penetrantes a la hora de mostrar los puntos débiles de los argumentos más arraigados en cualquier tema. En *Contra apocalípticos*, Zamora Bonilla, catedrático de filosofía de la ciencia en la UNED, hinca el diente con fuerza, pero también con amenidad y sentido del humor —otra marca de la casa—, en tres de las corrientes intelectuales más influyentes del momento, caracterizadas por anunciar tiempos oscuros para el ser humano: el ecologismo, el animalismo y el posthumanismo.

Conviene comenzar precisando que Zamora Bonilla no se enfrenta en este libro al ecologismo, al animalismo ni al posthumanismo tomados cada uno de ellos en su acepción genérica. Su crítica va dirigida a ciertas versiones radicales de estas corrientes de pensamiento. En concreto, a la versión catastrofista del ecologismo, a la versión antiespecista del animalismo y a la versión antihumanista y «singularista» del posthumanismo. Pero queda claro en el libro que ni se niegan los graves problemas ambientales que hemos creado, incluido un cambio climático de origen antropogénico; ni se rechaza la idea de que los animales merecen respeto y debemos evitarles los sufrimientos que podamos (siempre que esto no cause más sufrimiento a más animales); ni se condena el uso futuro de la biotecnología para

la mejora del ser humano. El mensaje general que el libro quiere transmitir lo deja muy claro el autor en las primeras páginas: «La única actitud racional ante un debate que se refiere a asuntos dominados por la incertidumbre y la complejidad es la de no aferrarnos con demasiada vehemencia a nuestras convicciones morales, sean estas las que sean».

La primera parte del libro consta de tres capítulos en los que básicamente se hace una defensa del relativismo moral y se subraya el papel que desempeñan las emociones en la aceptación de los juicios morales. No se trata tanto de una defensa del emotivismo moral en sentido estricto (puesto que también el razonamiento moral tiene su parte), cuanto de un pluralismo en el que se reivindica la toma de conciencia de los fundamentos, siempre revisables y contextuales, de nuestras posiciones morales.

La segunda parte es la dedicada a la crítica al ecologismo. Lo que Zamora Bonilla, que además de filósofo es doctor en economía, nos viene a decir es que, en efecto, hay que tomarse en serio las amenazas que se ciernen sobre el ser humano debidas al desarrollo industrial y al exceso de población. Pero teniendo muy presente que el impacto económico negativo del calentamiento global, incluso en los escenarios pesimistas que se han planteado con seriedad, será mucho menor en términos económicos de lo que pensamos, y que, en todo caso, para hacer frente a dichas amenazas lo mejor es no empobrecernos ahora por el prurito de que así contribuiremos a salvar mejor la situación futura. Zamora Bonilla cree que el ecologismo radical, o «cascarrabias», como él lo llama, aprovecha los problemas reales que se ciernen sobre el entorno para introducir su propia agenda ideológica, habitualmente anticapitalista. Esta, sin embargo, solo debería tomarse como una de las posiciones posibles en el debate, y no como la única viable, habiendo además razones de peso para pensar que no es precisamente la mejor de las propuestas que hay sobre la mesa.

La tercera parte del libro se ocupa del animalismo. Este puede ser entendido sencillamente como la defensa de que el valor de los animales no puede ser meramente instrumental. Es el reconocimiento de que la vida de los animales tiene un valor que debemos tomar en consideración, y que, por tanto, el respeto a esa vida tiene relevancia moral. Cómo se concrete esa relevancia moral es una cuestión a discutir. El reconocimiento de ciertos derechos es una vía, pero una cuestión es si habría medios mejores para ese fin. Es cierto que esto constituye una forma amplia y —admitámoslo— algo difusa de entender el animalismo, pero tiene al menos la virtud de señalar que no hay por qué aceptar que algunas corrientes animalistas muy en boga quieran incluir en él posiciones bastante más discutibles, como por ejemplo el antiespecismo.

Su crítica se centra particularmente en dos puntos: en la idea de que el círculo de seres por los que sentimos una empatía que nos lleva a darles un trato moral se expandirá necesariamente hasta incluir a todos los animales, cuyo sufrimiento debería considerarse igual al nuestro, así como en la fundamentación racionalista (kantiana) de los derechos de los animales. Por fortuna, el animalismo no exige ser un antiespecista que conceda igual importancia moral a todo sufrimiento, ni exige incluir en el círculo de la moralidad a todos los animales, ni exige buscarle fundamentaciones metafísicas extrañas a la conveniencia de reconocer ciertos derechos a algunos animales. Frente a la tesis animalista de que tenemos la obligación moral de evitar causar sufrimiento a cualquier ser sintiente, lo que Zamora Bonilla propone es no causarles más sufrimiento del que encontrarían si se hallaran en la naturaleza. La distinción entre *bíos* y *zoé* resulta aquí relevante.

> Un libro en el que el lector encontrará motivos para la reflexión, coincida o no con lo que en él se defiende

Por último, la cuarta parte de este trabajo está dedicada a la discusión del posthumanismo, entendido fundamentalmente como posthumanismo cultural; es decir, como la crítica al humanismo clásico realizada desde posiciones filosóficas posmodernistas. Aunque también analiza las principales propuestas de Yuval Noah Harari y de Nick Bostrom, que encajan más bien en el transhumanismo tecnocientífico, partidario del mejoramiento humano mediante la tecnología. El posthumanismo cultural considera que el ser humano, tal como lo ha venido entendiendo la tradición filosófica occidental, ya no existe, y que debemos sustituir ese concepto por una visión plural, no antropomórfica y no dualista de lo humano. Zamora Bonilla considera que hay mucho de aprovechable en esta crítica, tanto más cuanto que los valores sobre los que se sustenta son, según su criterio, los mismos que los del humanismo. Pero hay otros aspectos de esta corriente que serían rechazables, como el carácter demasiado especulativo de sus análisis sociales y las pocas garantías de que sus propuestas alternativas vayan a resolver alguno de los problemas sociales que denuncian.

El libro se cierra con un capítulo «sobre nuestro futuro a larguísimo plazo» que es sumamente sugerente y valiente en sus predicciones. Es probablemente donde más discreparía de las ideas presentadas aquí por Zamora Bonilla (también lo haría en algunos aspectos puntuales de su crítica al ecologismo y al animalismo). Yo auguro que los cambios propiciados en nuestra especie por la tecnología serán mucho mayores de lo que él contempla, pero esta discrepancia es esperable cuando se trata de imaginar un futuro muy lejano. Probablemente se produce aquí un efecto mariposa: pequeñas discrepancias sobre el presente se convierten en grandes diferencias sobre el futuro. Él cree que «el progreso científico, tecnológico y social terminará mucho antes de que lo haga la propia humanidad». Yo, sin embargo, creo que continuará —más lentamente quizá— mientras haya humanidad. Lástima que los transhumanistas no tengan razón en lo de la longevidad indefinida para que podamos, tanto él como yo, comprobar dentro de miles de años quién se acercó más a la realidad.

Soy consciente de que los ecologistas, los animalistas y los posthumanistas que lean esta reseña pensarán que su posición no queda en absoluto tocada de forma grave por las objeciones que he mencionado. Puede que así sea, pero una reseña breve no puede nunca dar cuenta de la complejidad de los argumentos. Lo más que puede, como esta, es asegurarle al lector interesado que en este libro encontrará motivos para la reflexión, coincida o no con lo que en él se defiende, y que, además, no se aburrirá en absoluto. ¿De cuántos libros que se publican hoy puede decirse lo mismo?

—Antonio Diéguez Lucena
Universidad de Málaga

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



EL CLIMA DE TUS HIJOS
CÓMO PREPARARTE PARA LA EMERGENCIA CLIMÁTICA

Francisco J. Tapiador
Next Door Publishers, 2021
ISBN: 978-84-122556-4-5
248 págs. (20 €)



LOS OTROS VUELOS A LA LUNA
LA HISTORIA Y LOS SECRETOS DE LAS EXPLORACIONES LUNARES DESPUÉS DEL APOLO 11

Rafael Clemente
Libros Cúpula, 2021
ISBN: 978-84-480-2831-2
392 págs. (19,50 €)

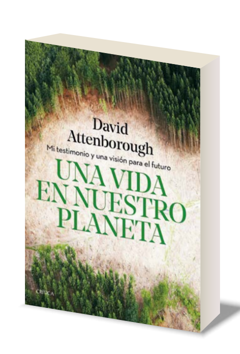
ESCRITO EN LOS ÁRBOLES
LA HISTORIA DEL MUNDO CONTADA EN ANILLOS

Valerie Trouet
Crítica, 2021
ISBN: 978-84-9199-307-0
328 págs. (20,90 €)



UNA VIDA EN NUESTRO PLANETA
MI TESTIMONIO Y UNA VISIÓN PARA EL FUTURO

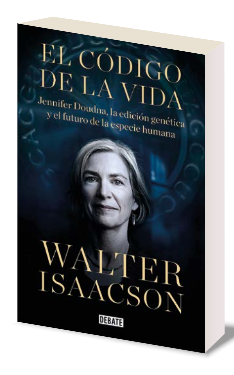
David Attenborough
Crítica, 2021
ISBN: 978-84-9199-311-7
288 págs. (19,90 €)





EL TIEMPO
TODO LO QUE TE GUSTARÍA SABER SOBRE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

José Miguel Viñas
Shackleton Books, 2021
ISBN: 978-84-1361-056-6
208 págs. (16,90 €)



EL CÓDIGO DE LA VIDA
JENNIFER DOUDNA, LA EDICIÓN GENÉTICA Y EL FUTURO DE LA ESPECIE HUMANA

Walter Isaacson
Debate, 2021
ISBN: 978-8418056642
624 págs. (24,61 €)



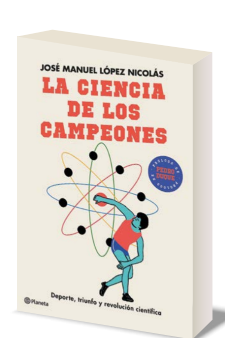
UNA HISTORIA DEL UNIVERSO EN 100 ESTRELLAS

Florian Freistetter
Ariel, 2021
ISBN: 978-84-344-3357-1
336 págs. (19,90 €)



LA CIENCIA DE LOS CAMPEONES
DEPORTE, TRIUNFO Y REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

José Manuel López Nicolás
Planeta, 2021
ISBN: 978-84-08-24315-1
304 págs. (17,90 €)



Recopilación de Mark Fischetti

JUNIO

1971

Las clases sociales en los pavos

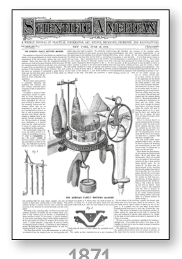
«Realizamos un minucioso estudio sobre la población de pavos silvestres que viven en el Refugio de Fauna Welder (Texas) y en su entorno, y descubrimos un sorprendente grado de estratificación social, mayor que el observado hasta ahora en cualquier otra sociedad de vertebrados, salvo las humanas. En esa comunidad de pavos, el estatus de cada individuo queda determinado en el primer año de vida, y no cambia durante la vida del animal. Una consecuencia es que la mayoría de los machos nunca tienen ocasión de aparearse. Presumiblemente, ese fenómeno confiere ventajas a la sociedad, lo cual ofrece un interesante tema de especulación. Quizá los pavos de Welder brinden a los humanos un modelo de conducta: muchas veces podría sernos beneficioso, incluso a nivel individual, conceder menos atención a la autocomplacencia y más a la eficacia de grupo.»



1971



1921



1871

Bombas lunares

«Los detalles de la superficie lunar son claramente visibles a simple vista. Se ha sostenido que las depresiones que presenta dicha superficie se deben a la actividad volcánica. Pero más recientemente se ha planteado otra hipótesis: las formaciones con aspecto de cráter se deben al impacto y penetración de meteoritos. Las pruebas que apoyan esa idea proceden de los experimentos militares realizados en el Aeródromo Langley, en Virginia. Con ellos se proponía obtener información sobre el efecto de las bombas lanzadas desde aviones. Las fotografías revelan que las bombas producen unas depresiones notablemente similares a las de la Luna.»

1871

A las tortugas les gusta el telégrafo

«Un comunicado reciente del superintendente de la Compañía Internacional de Telégrafos entre Punta Rosa y Cayo Hueso ha introducido un nuevo renglón en la lista de peligros que acechan a los cables oceánicos. Durante el año pasado, el cable en cuestión había sido tantas veces dañado o roto que un examen cuidadoso mostró que la causa se hallaba en la tortuga boba, abundante en esas aguas. En muchos puntos el cable tenía el aspecto de haber sido mordido, y en otros, de haber sido comprimido por ambos lados hasta el punto de perder su conductividad. Las roturas y los daños se producen donde más abundan las tortugas bobas. La compañía ha cursado un pedido de cable mucho más largo y más resistente, y cuando se haya tendido, las asaltantes tendrán algo más consistente donde afilar sus mandíbulas que el actual cable de acero trenzado.»

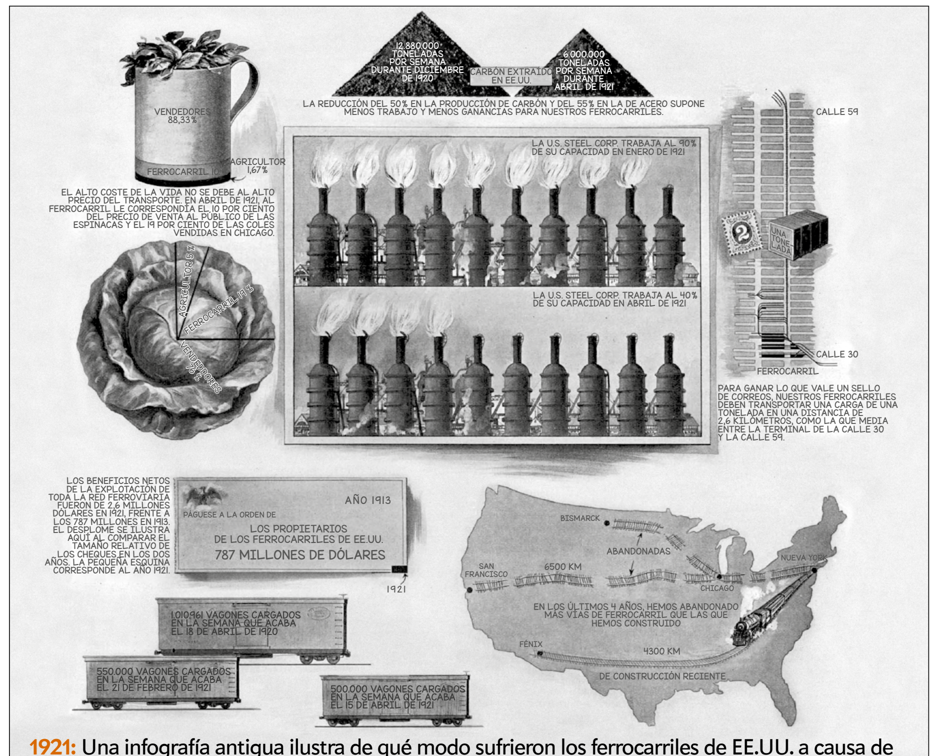
Ancianidad precoz

«Son legión el número de hombres cuya mente es más débil a los cuarenta o cincuenta. Su mente se halla en un estado lábil, raquítico, incapaz de afrontar las cuestiones cotidianas.»

1921

El rayo cae dos veces

«La manida teoría de que nunca caen dos rayos en un mismo sitio ha sido modificada por expertos forestales del Departamento de Agricultura de EE.UU. en estos términos: los rayos se descargan muy a menudo casi en los mismos lugares. Hay unas zonas donde habitualmente puede darse por hecho que caerán rayos con cada tormenta eléctrica. Con los datos acumulados sobre las causas y las localizaciones de los incendios en los bosques nacionales, podrían confeccionarse mapas de las zonas de descargas e introducir medidas preventivas, como los cortafuegos, el pastoreo regulado y normas para retirar los árboles muertos. Los silvicultores creen que permitirían combatir, de forma más o menos inmediata, los incendios causados por rayos en su inicio.»



1921: Una infografía antigua ilustra de qué modo sufrieron los ferrocarriles de EE.UU. a causa de una economía deprimida caracterizada por la deflación. Los trenes no pueden transportar una carga que no existe.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXIV, N.º 25, 18 DE JUNIO DE 1921

CONSERVACIÓN

Probióticos para salvar el coral

Elizabeth Svoboda

Se están ensayando cócteles de bacterias diseñados para mejorar la supervivencia de los corales.



ORNITOLOGÍA

El anillamiento científico de aves

Arantza Leal

Así han evolucionado los esfuerzos por comprender la migración de estos vertebrados.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

¿Robots escritores?

Matthew Hutson

Los sistemas de lenguaje basados en inteligencia artificial ya son capaces de generar textos. Sin embargo, no pueden comprenderlos.

ANTROPOLOGÍA

El primer viaje a las Américas

Jennifer Raff

El poblamiento de los subcontinentes americanos fue mucho más complejo de lo que se creía. Implicó el aislamiento y la fusión de múltiples poblaciones durante decenas de miles de años.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *¿Los delfines son diestros o zurdos?*; Javier Grande: *Apuntes*, *Las leyes matemáticas de la conectividad* y *La nueva vida de la óptica adaptativa*; Gonzalo Claros: *El insólito ADN de los virus bacteriófagos* y *Condensados biomoleculares, una nueva fuente de organización celular*; José Óscar Hernández Sendín: *La energía nuclear, diez años después de Fukushima*; Lorenzo Gallego: *La adaptación del cerebro tras un trasplante de mano*; Ricardo Bastos: *Embriones en una placa de Petri*; Pedro Pacheco González: *El origen del hogar*; Fabio Teixidó: *Vida en las profundidades del subsuelo marino*; J. Vilardell: *Cómo crear grandes campos magnéticos* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España